

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta stavební

Katedra hydrotechniky



DIPLOMOVÁ PRÁCE

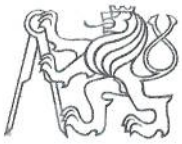
Matematický model malé vodní elektrárny

Mathematical model of small hydropower plant

Vedoucí bakalářské práce: Dr. Ing. Petr Nowak

Květen 2019

Bc. Jonáš MELICHAR



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Melichar Jméno: Jonáš Osobní číslo: 424336
Zadávací katedra: Katedra hydrotechniky
Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Vodní hospodářství a vodní stavby

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Matematický model malé vodní elektrárny

Název diplomové práce anglicky: Mathematical model of small hydropower plant

Pokyny pro vypracování:

V rámci diplomové práce bude popsán a analýzován komplexní systém nízkotlaké malé vodní elektrárny, její hydraulický systém s definicí jednotlivých prvků a budou vypočteny hydraulické ztráty včetně vlivu účinnosti synchronního generátoru. Modelové charakteristiky turbíny budou přepočteny na provozní charakteristiky. V prostředí MATLAB bude sestaven model nízkotlaké vodní elektrárny z jednotlivých prvků a bude na něm proveden hydrotechnický výpočet v časové řadě i čáře m-denních průtoků se zobrazením pracovních bodů v jednotlivých charakteristikách.

Seznam doporučené literatury:

BROŽA, Vojtěch, Pavel GABRIEL, František ČIHÁK, Jitka KUČEROVÁ a Antonín PROCHÁZKA. Využití vodní energie. Dotisk. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1993. ISBN 80-01-00392-2.

GABRIEL, Pavel, František ČIHÁK a Petr KALANDRA. Malé vodní elektrárny. Praha: České vysoké učení technické, 1998. ISBN 80-01-01812-1.

Jméno vedoucího diplomové práce: Dr. Ing. Petr Nowak

Datum zadání diplomové práce: 21. 2. 2019 Termín odevzdání diplomové práce: 19. 5. 2019
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

21. 2. 2019

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s metodickým pokynem ČVUT 1/2009 „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

.....

Místo zpracování, celé datum

.....

Bc. Jonáš Melichar

Poděkování

Rád bych poděkoval panu Dr. Ing. Petru Nowakovi za ochotu, odborné vedení a cenné rady, které mi pomohly tuto diplomovou práci dokončit. Neméně bych chtěl poděkovat všem ostatním učitelům, kteří mi až do závěru mého studia pomohli dospět.

ABSTRAKT

V rámci této diplomové práce byl vytvořen matematický model malé vodní elektrárny v programovacím prostředí MATLAB. Motivací bylo podpořit využívání obnovitelných zdrojů energie vyvinutím nástroje, usnadňujícího plánování výstavby nových vodních elektráren. V teoretické části práce je popsán systém nízkotlaké malé vodní elektrárny, zejména prvky a vztahy podstatné pro sestavení modelu. Těžištěm praktické části práce je vývoj počítačového programu, sloužícího jako zdroj informací pro technickoekonomické zhodnocení různých uspořádání plánované vodní elektrárny. Fungování tohoto programu a způsob jeho ovládání jsou v práci podrobně popsány. Dokončený model byl otestován na reálných vstupech. Řadou simulací byla zpracována citlivostní analýza roční výroby energie na provozních otáčkách a průměru oběžného kola turbíny virtuální elektrárny v profilu jezu Terezín. Rovněž byla zpracována simulace skutečného provozu této elektrárny v průtokové řadě z roku 2003. Výsledky provedených simulací odpovídají očekáváním, vyvinut byl tedy funkční software s celou řadou využití při řešení reálných problémů z oblasti hydroenergetiky.

KLÍČOVÁ SLOVA

Malá vodní elektrárna, matematický model, MATLAB, Kaplanova turbína, kavitace, citlivostní analýza.

ABSTRACT

A mathematical model of small hydropower plant in MATLAB programming environment was developed in this master's thesis. The motivation was to encourage the use of renewable energy by creating a tool to facilitate the planning process of a new hydropower plant. The theoretical part of the thesis describes a system of low head small hydropower plant, especially components and relationships substantial for the model development. The practical part of the thesis develops a computer program that serves as a source of information for a technical-economical assessment of various layouts of planned hydropower station. The thesis describes in detail the operation of this program and how it is controlled by the user. Upon completion, the model was tested on real data. By a number of simulations a sensitivity analysis evaluating effects of a rotational speed and a diameter of the turbine impeller on annual energy production of a virtual hydropower plant in the Terežín weir profile was elaborated. Also a simulation of the actual operation of this power plant on 2003 discharge record series was performed. The simulation results meet the expectations, therefore a functional software with numerous applications to solve real problems in the field of hydropower use was developed.

KEY WORDS

Small hydropower plant, mathematical model, MATLAB, Kaplan turbine, cavitation, sensitivity analysis.

OBSAH PRÁCE

1. ÚVOD.....	- 3 -
2. SPECIFIKACE CÍLŮ PRÁCE.....	- 5 -
3. SYSTÉM VODNÍ ELEKTRÁRNY	- 6 -
3.1. Nízkotlaká malá vodní elektrárna	- 6 -
3.2. Teoretický výkon vodní turbíny	- 7 -
3.3. Průtok vodní elektrárnou	- 7 -
3.4. Průtok turbínou	- 8 -
3.5. Spád	- 10 -
3.6. Účinnost soustrojí	- 11 -
3.7. Kavitace	- 12 -
3.8. Výpočet v průtokové řadě.....	- 14 -
4. MODELOVÉ CHARAKTERISTIKY TURBÍNY	- 16 -
4.1. Jednotkové veličiny	- 16 -
4.2. Universální charakteristika	- 17 -
4.3. Provozní charakteristika	- 18 -
5. MODEL V PROSTŘEDÍ MATLAB	- 19 -
5.1. Základní popis.....	- 19 -
5.2. Uživatelské rozhraní GUIDE.....	- 23 -
5.2.1. Vnější hydraulický systém	- 24 -
5.2.2. Ovladače	- 25 -
5.2.3. Vodní elektrárna	- 25 -
5.2.4. Řešení v průtokové řadě	- 27 -
5.3. Vstupní datové soubory	- 28 -
5.3.1. Konzumpční křivka dolní vody	- 28 -
5.3.2. Závislost hydraulických ztrát na průtoku	- 28 -
5.3.3. Universální charakteristika turbíny	- 29 -
5.3.4. Průtoková řada	- 29 -
5.4. Body přepínání.....	- 30 -
5.5. Zpracování průtoku.....	- 33 -
5.6. Počet soustrojí v provozu.....	- 34 -
5.7. Hydraulické ztráty.....	- 34 -

5.8.	Universální charakteristika	- 35 -
5.9.	Provozní charakteristika	- 36 -
5.10.	Výkon vodní elektrárny.....	- 39 -
5.11.	Kavitace.....	- 39 -
6.	OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI MODELU	- 40 -
6.1.	Vstupní data	- 40 -
6.1.1.	Čára trvání m-denních průtoků.....	- 40 -
6.1.2.	Průtoková řada z roku 2003.....	- 41 -
6.1.3.	Kóta hladiny v toku	- 41 -
6.1.4.	Hydraulické ztráty	- 42 -
6.1.5.	Universální charakteristika.....	- 42 -
6.1.6.	Omezující podmínky	- 43 -
6.1.7.	Účinnosti.....	- 43 -
6.2.	Řešení v čáře překročení m-denních průtoků	- 43 -
6.2.1.	Citlivostní analýza výroby energie na provozních otáčkách.....	- 44 -
6.2.2.	Citlivostní analýza výroby na otáčkách a průměru OK.....	- 50 -
6.3.	Řešení v reálné průtokové řadě.....	- 54 -
7.	ZÁVĚR.....	- 57 -
8.	SEZNAMY	- 59 -
8.1.	Použitá literatura	- 59 -
8.2.	Seznam tabulek	- 60 -
8.3.	Seznam obrázků.....	- 60 -
8.4.	Seznam zkratk	- 62 -
8.5.	Obsah příloženého CD.....	- 62 -
9.	PŘÍLOHY	- 63 -

1. ÚVOD

Vodní energie patří mezi významné obnovitelné zdroje energie, její využití má řadu nepopiratelných ekologických, provozních i jiných výhod. Vodní elektrárny mimo jiné plní nezastupitelnou úlohu pro udržení stability elektrické sítě. Zvýšení podílu obnovitelné energie na celkové spotřebě bylo schváleno jako součást 17 cílů udržitelného rozvoje resolucí OSN v rámci Agendy 2030. Tento krok je považován za jeden z důležitých nástrojů boje proti klimatické změně, významné hrozbě pro samotnou existenci lidstva. Rozvoj využití vodní energie je tedy otázkou více než aktuální. [6] [11]

Vhledem k poloze České republiky na rozvodí tří moří je velká část jejího hydroenergetického potenciálu rozptýlena v malých vodních tocích. Z dosud nevyužitého hydroenergetického potenciálu lze tedy pouze asi 25 % využít v středních a velkých vodních elektrárnách, zbylých 75 % je třeba využít v malých vodních elektrárnách (s instalovaným výkonem do 10 MW). Výstavba velkých vodních elektráren s akumulací vody je také provázána značnou nevolí ze strany veřejnosti a ekologických aktivistů pro své vlivy na okolní prostředí, zatímco výstavba malých vodních elektráren (MVE) je spíše tolerována. Opodstatněnost zaměření na MVE v rámci oboru využití vodní energie je tedy zřejmá. [6]

Matematické modelování je obor využívající matematického aparátu pro popis reálného systému. Vzniklý model je pouze zjednodušením reality, při citlivé volbě rozlišovacího měřítko však podává dostatečně přesné výsledky. S rozvojem výpočetní techniky navíc došlo k výraznému rozvoji matematického modelování – lze sestavovat přesnější modely a především lze provést daleko větší počet simulací a otestovat tedy širší škálu vstupních parametrů. Matematické modelování proto v současnosti představuje cenný nástroj při rozhodovacím procesu a dobré uplatnění nalézá i ve vodním hospodářství. [3]

V rámci této diplomové práce je zpracován matematický model nízkotlaké MVE v programu MATLAB s využitím grafického uživatelské rozhraní, umožňujícího snadné ovládání a editaci jednotlivých parametrů elektrárny. V programu lze provést výpočet pro zvolený dílčí průtok v toku, umožňující prozkoumání jednotlivých provozních stavů elektrárny, jakožto i výpočet v průtokové řadě, a tedy simulaci delšího časového období. Universalita programu poskytuje možnost zhodnocení libovolné lokality (s běžnými podmínkami pro MVE v ČR). Řada editovatelných vstupních parametrů umožňuje udělat citlivostní analýzu výroby elektrické energie na průměru oběžného kola, provozních

otáčkách, počtu instalovaných soustrojí aj. Program rovněž vyhodnocuje maximální přípustnou kótu oběžného kola turbíny, při níž je zajištěn bezkavitační provoz, maximální dosažený výkon na turbíně a elektrárně a optimální dělení průtoku mezi jednotlivé turbíny.

Matematický model, vytvořený v rámci této diplomové práce, má tedy mnohostranné využití. Poskytuje cenná data pro primární technickoekonomické zhodnocení při výběru lokality pro realizaci hydroenergetického díla. Rovněž jej lze využít jako zdroj doplňujících informací při iterativním procesu projektové přípravy. V neposlední řadě, díky názorné vizualizaci jednotlivých procesů provozu vodního díla, lze program využít jako učební pomůcku v odborných předmětech zabývajících se problematikou využití vodní energie.

2. SPECIFIKACE CÍLŮ PRÁCE

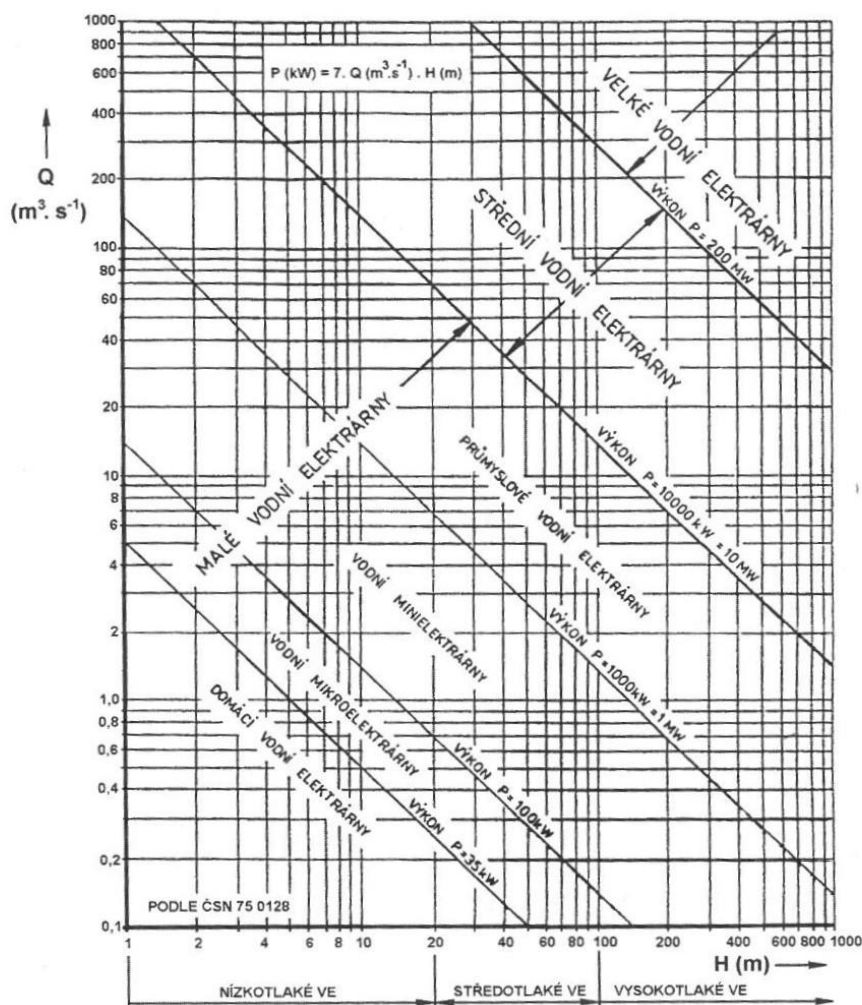
- Analýza systému nízkotlaké malé vodní elektrárny na základě studia odborné literatury k tématu.
- Určení podstatných prvků a vztahů vodní elektrárny pro sestavení matematického modelu odpovídající komplexity.
- Specifikace modelových charakteristik turbíny, jejich využití a způsobu převedení universální charakteristiky turbíny na charakteristiku provozní.
- Sestavení matematického modelu malé vodní elektrárny v programovacím prostředí MATLAB s důrazem na:
 - universalitu vytvořeného programu,
 - zahrnutí všech prvků a vazeb odpovídajících zvolené komplexitě modelu,
 - vytvoření grafického uživatelského rozhraní pro snadné ovládání programu,
 - možnost editace široké škály parametrů vodní elektrárny umožňující jejich optimalizaci při aplikaci modelu na reálný problém,
 - vhodnou vizualizaci sledovaných jevů na vodní elektrárně.
- Detailní popis sestaveného modelu včetně způsobu jeho ovládání uživatelem.
- Ověření funkčnosti vytvořeného modelu na reálných datech:
 - simulací provozu elektrárny v reálné průtokové řadě,
 - provedením citlivostní analýzy roční výroby energie na vybraném parametru či kombinaci parametrů elektrárny.

3. SYSTÉM VODNÍ ELEKTRÁRNY

Řešení každé vodní elektrárny je jedinečné. Jde o unikát, pečlivě přizpůsobený místním podmínkám a požadavkům, kladeným na toto dílo. Přesto je možné mezi jednotlivými provedeními nalézt určité podobnosti a zařadit je tedy do několika kategorií, mající svá specifika. V následujícím textu je podrobně rozepsán systém nízkotlaké malé vodní elektrárny, jež je předmětem této diplomové práce.

3.1. Nízkotlaká malá vodní elektrárna

Jako malé vodní elektrárny se označují díla o instalovaném výkonu do 10 MW. Tuto kategorii lze dále rozdělit na průmyslové vodní elektrárny (1–10 MW), vodní minielektrárny (100–1000 kW), vodní mikroelektrárny (35–100 kW) a domácí vodní elektrárny (do 35 kW), jak patrně z *obr. 3.1*. Jako nízkotlaké se označují vodní elektrárny využívající spád do 20 m. [6]



Obr. 3.1 – Rozdělení vodních elektráren dle instalovaného výkonu [9]

3.2. Teoretický výkon vodní turbíny

Účelem výstavby vodní elektrárny je přeměna potenciální energie vody na energii elektrickou. Efektivní využití vodní energie tedy vyžaduje soustředění spádu a průtoku určitého úseku vodního toku. Tlaková a kinetická energie vody protékající elektrárnou je ve vodní turbíně přeměněna na mechanickou energii rotující hřídele. Jejím spojením s elektrickým generátorem je dále mechanická energie přeměněna na elektrickou, tedy formu energie snadno transportovatelnou a využitelnou. Teoretický výkon vodní turbíny se vypočte podle vztahu:

$$P_0 = H \cdot Q \cdot \rho \cdot g \quad (3.1)$$

kde $H \dots$ je užitný spád vodní turbíny (H_{netto}), $Q \dots$ je průtok turbínou, $\rho \dots$ je měrná hmotnost vody a $g \dots$ je gravitační zrychlení. [2]

Skutečný výkon však bude menší, jelikož při přeměnách mezi jednotlivými druhy energie dochází ke vzniku ztrát. Význam a zpřesnění rovnice (3.1) jsou blíže rozepsány v následujících podkapitolách. [6]

3.3. Průtok vodní elektrárnou

Pro soustředění spádu je na vodním toku třeba vybudovat vzdouvací stavbu, v případě nízkotlakých vodních elektráren zpravidla jez. Jezy se obvykle budují jako víceúčelové stavby, jednotlivé účelové objekty se spojují se do jednoho funkčního celku zvaného zdymadlo. Podle konkrétní lokality a požadavků může zdymadlo krom vodní elektrárny obsahovat také objekt plavební komory, rybiho přechodu, odběrného zařízení pro závlahy apod. [4]

Pro hydroenergetické využití tedy nemusí být nutně k dispozici celý průtok ve vodním toku, nýbrž pouze jeho zůstatková část po uspokojení ostatních odběratelů s vyšší prioritou odběru:

$$Q_{ve} = \max \left[\left(Q - \sum_{i=1}^n Q_{od,i} \right), 0 \right] \quad (3.2)$$

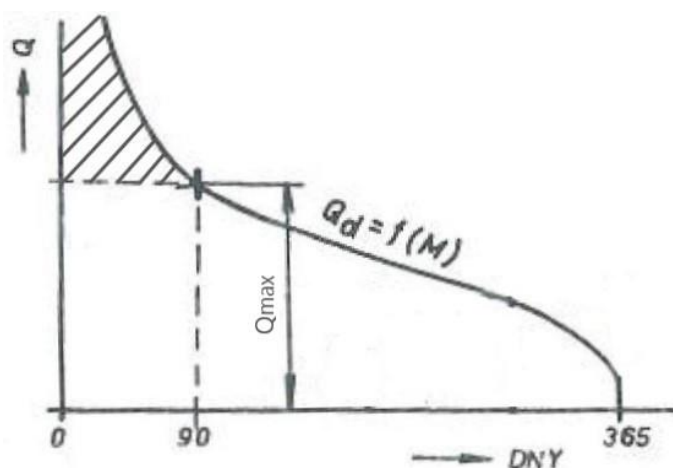
kde $Q_{ve} \dots$ je průtok vodní elektrárnou, $Q \dots$ je průtok v toku a $Q_{od,i} \dots$ je požadavek na odběr z toku odběratele i s vyšší prioritou.

Tato skutečnost se může mít, v závislosti na velikosti požadavku ostatních odběratelů s vyšší prioritou, relativně velký vliv na provoz vodní elektrárny v málo vodných obdobích.

Průtok vodní elektrárnou je rovněž limitován typem, velikostí a počtem instalovaných turbín. Maximální průtok využitelný vodní elektrárnou (hltnost turbín) se ideálně volí na základě technickoekonomického rozboru. Pro předběžný odhad však lze využít čáru překroční průměrných denních průtoků v dané lokalitě. Obvykle se volí průtok v okolí bodu s největší křivostí této čáry, což v podmínkách České republiky odpovídá zhruba průtoku Q_{90d} až Q_{120d} průměrně vodného roku. Rovnici (3.2) lze tedy upravit do tvaru [6]:

$$Q_{ve} = \max \left[\min \left[\left(Q - \sum_{i=1}^n Q_{od,i} \right), (Q_{max}) \right], 0 \right] \quad (3.3)$$

kde Q_{ve} ... je průtok vodní elektrárnou, Q ... je průtok v toku, $\sum_{i=1}^n Q_{od,i}$... jsou požadavky na odběr ostatních odběratelů s vyšší prioritou a Q_{max} ... je max. využitelný průtok VE.



Obr. 3.2 – Maximální průtok vodní elektrárnou [6 - upraveno]

3.4. Průtok turbínou

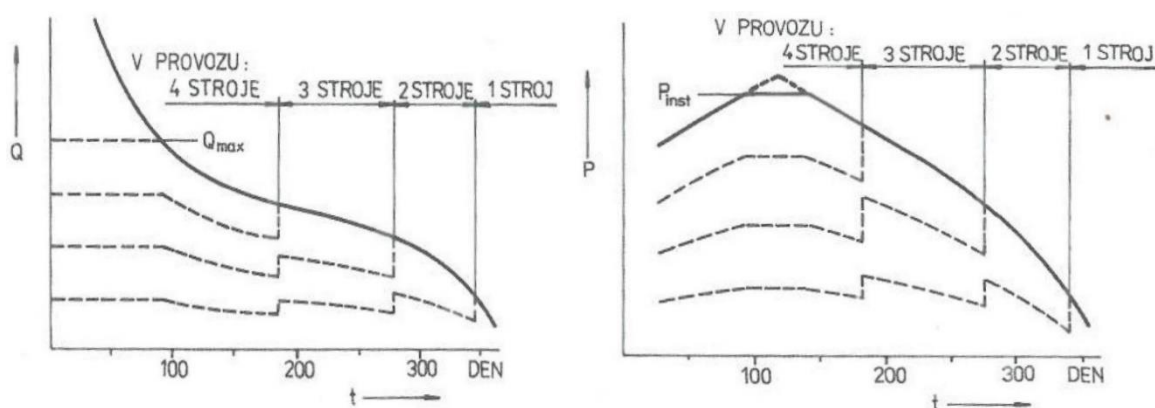
Počet instalovaných soustrojí ve vodní elektrárně závisí na několika kritériích. Z technického hlediska se snažíme dosáhnout co nejvyšší účinnosti celé vodní elektrárny. Počet instalovaných soustrojí tedy závisí na zvoleném typu turbíny a rozkolísanosti průtoků ve vodním toku. Méně soustrojí je možno instalovat při vyrovnaných průtocích a u turbín, které lze regulovat v široké oblasti zatížení s uchováním vysoké účinnosti (např. typ Kaplanův). Z důvodu možných poruch je výhodné vždy instalovat více než jedno soustrojí. Z hlediska investičních a provozních nákladů bývá výhodnější menší počet turbín větších

rozměrů. Konkrétní volba počtu turbín by tedy měla být podložena vhodným technickoekonomickým rozbořem. [2]

Na obr. 3.3 je zobrazeno typické rozdělení průtoku a výkonu v čáře m-denních průtoků mezi čtyři instalované turbíny totožných rozměrů. Při nízkých průtocích v toku pracuje pouze jeden stroj až do dosažení svého přepínacího bodu. Poté najíždí do provozu druhé soustrojí a celkový průtok VE se mezi ně dělí rovným dílem. Analogicky najíždí do provozu třetí a čtvrtý stroj. Při překročení maximálního průtoku VE již není k dispozici další kapacita a přebytečný přítok přepadá jalově přes vzdouvací těleso. Přepínací body odborná literatura doporučuje řešit pomocí maximálního průtoku turbínou $Q_{turb,max}$, který lze při shodných velikostech strojů získat ze vztahu (3.4). Jde však o zjednodušení, neboť přepínání mezi turbínami při dosažení fixně daného $Q_{turb,max}$ nemusí zajišťovat maximální výrobu energie. V rámci této DP je snaha přepínací body optimalizovat.

$$Q_{turb,max} = \frac{Q_{max}}{x} \quad (3.4)$$

kde Q_{max} ... je max. průtok vodní elektrárnou a x ... je počet instalovaných soustrojí. [1]



Obr. 3.3 – Rozdělení průtoku a výkonu mezi instalované stroje [1]

Vodní turbína je rovněž limitována minimálním průtokem, který je ještě schopna zpracovat. Pokud tento průtok označíme $Q_{turb,min}$, rovnici (3.3) lze omezit podmínkou:

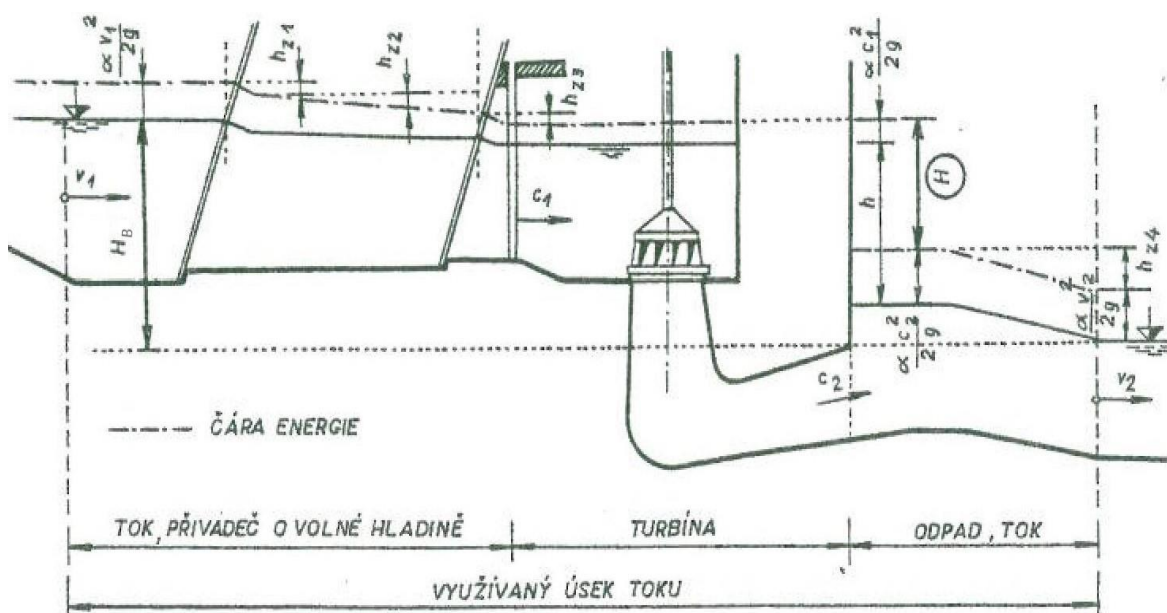
$$if \quad Q_{ve} < Q_{turb,min} \quad (3.5)$$

$$Q_{ve} = 0$$

kde Q_{ve} ... je průtok vodní elektrárnou.

3.5. Spád

Rozdíl hladin před a za vodní elektrárnou, tedy celkový statický spád, který chceme hydroenergeticky využít, se nazývá hrubý spád H_B (brutto). Tento spád je snadno určitelný nivelací, nelze ovšem celý využít, neboť je k dispozici pouze při nulovém průtoku vodní elektrárnou. Pro výpočet výkonu vodní turbíny je podstatnější užitný spád H (netto – také čistý spád), jenž je výškovým rozdílem mezi čarami energie těsně před a za turbínou. Je vypočten odečtením hydraulických ztrát na přiváděči a odpadu turbíny od hrubého spádu. Ztráty ve spirále a savce se započítávají do účinnosti turbíny. [6]



Obr. 3.4 – Schéma pro určení užitého spádu [5]

U reakčního typu turbíny, používaného v nízkotlakých vodních elektrárnách, lze užitný spád určit pomocí Bernoulliho rovnice pro vstupní a výstupní profil turbíny za nenulového průtoku:

$$H = H_B + \frac{\alpha_1 \cdot v_1^2}{2g} - \frac{\alpha_2 \cdot v_2^2}{2g} - \sum h_{z_{1-n}} \quad (3.6)$$

kde H ... je užitný spád vodní turbíny, H_B ... je hrubý spád, $\frac{\alpha_1 \cdot v_1^2}{2g}$, $\frac{\alpha_2 \cdot v_2^2}{2g}$ jsou rychlostní výšky na vstupním a výstupním profilu, α ... je Coriolisovo číslo a $\sum H_{z_{1-n}}$... je součet hydraulických ztrát. [6]

Graficky je získání užitečného spádu H z hrubého spádu H_B znázorněno na *obr. 3.4*. Jsou do něj rovněž vyznačeny tyto obvykle se vyskytující ztráty:

h_{z_1} ... vtoková ztráta

h_{z_2} ... ztráta třením v přivaděči

h_{z_3} ... ztráta na česlích a vtoku do kašny turbíny

h_{z_4} ... ztráta v odpadu (třením, změnou směru apod.) [5]

3.6. Účinnost soustrojí

Účinností turbíny se rozumí poměr skutečného výkonu turbíny, měřeného na hřídeli, k teoretickému výkonu, určenému dle vztahu (3.1):

$$\eta_t = P/P_0 \quad (3.7)$$

kde η_t ... je celková účinnost turbíny, P ... je skutečný výkon a P_0 ... je teoretický výkon. [6]

Celková účinnost turbíny představuje veškeré ztráty, k nimž v turbíně dochází. Zahrnuje tedy několik dílčích ztrát. Hydraulické ztráty vznikají zejména při obtékání profilu lopatek turbíny, rázem na vstupu do lopatkové mříže, tvorbou a odtrháváním vírů apod. a určují hydraulickou účinnost η_h . Objemová účinnost η_q je důsledkem objemových ztrát ve spárách mezi lopatkami a komorou, ve spárách těsnících labyrintů atd. Mechanické ztráty v důsledku tření v ložiskách a ucpávkách turbíny určují mechanickou účinnost η_m . Celková účinnost lze tedy rovněž zapsat [1]:

$$\eta_t = \eta_h \cdot \eta_q \cdot \eta_m \quad (3.8)$$

Při transformaci mechanického výkonu, odevzdávaného turbínou, na výkon elektrický (měřený na svorkách generátoru) dochází rovněž ke ztrátám. Generátor má tedy také účinnost η_g , nabývající typicky hodnot 0.85 až 0.97. Pokud není generátor spojen s turbínou společnou hřídelí, vznikají ztráty převodem. Hodnota účinnosti převodu η_p výrazně závisí na zvoleném typu převodu. Pro dodávky do sítě je nutno vyrobenou elektrickou energii transformovat na vyšší napětí, i zde vznikají ztráty. Obvyklá účinnost transformátoru η_{tr} se pohybuje v rozmezí 0.92 až 0.98.

Celková účinnost soustrojí a transformátoru η_c je dána vztahem:

$$\eta_c = \eta_t \cdot \eta_g \cdot \eta_p \cdot \eta_{tr} \quad (3.9)$$

kde $\eta_t \dots$ je celková účinnost turbíny, $\eta_g \dots$ je účinnost generátoru, $\eta_p \dots$ účinnost převodu a $\eta_{tr} \dots$ je účinnost transformátoru. [1]

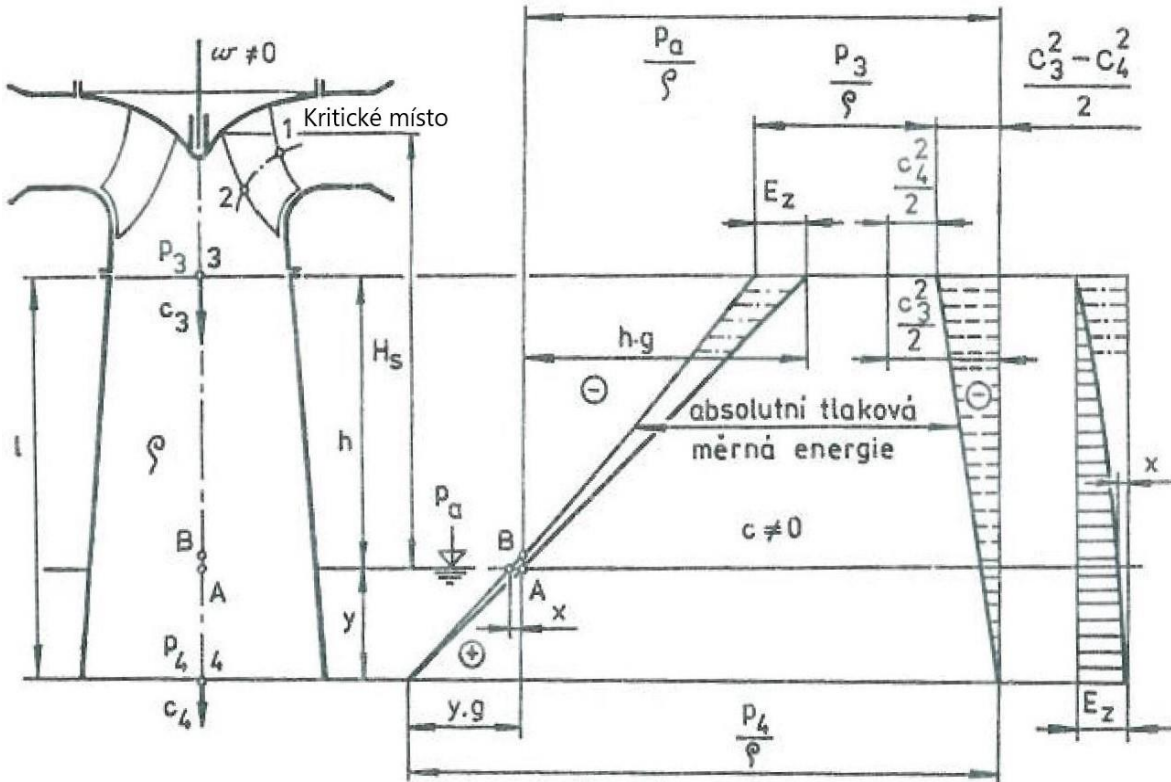
Užitím výše uvedených vztahů lze získat vzorec pro skutečný výkon vodní elektrárny P při aktuálním provozním stavu ve tvaru:

$$P = H \cdot Q \cdot \rho \cdot g \cdot \eta_c \cdot N_t \quad (3.10)$$

kde $H \dots$ je užitný spád vodní turbíny, $Q \dots$ je průtok turbínou, $\rho \dots$ je měrná hmotnost vody a $g \dots$ je gravitační zrychlení, $\eta_c \dots$ celková účinnost soustrojí a $N_t \dots$ počet turbín v provozu.

3.7. Kavítace

Jako kavítace se označuje nepříznivý fyzikální fenomén, jenž snižuje účinnost a především mechanicky poškozuje vodní turbínu. Kritické je místo největších podtlaků, typicky nejvýše položené místo výstupu kapaliny z lopatek oběžného kola, viz *obr. 3.5* [6] [10]:



Obr. 3.5 – Kritické místo turbíny a sací výška H_s [10]

Pokud absolutní tlak v kritickém bodě klesne na hodnotu tlaku nasycených vodních par při dané teplotě, voda začne samovolně vřít a vznikají bublinky vyplněné párou. Bublinky jsou unášeny proudem vody až do místa tlaku vyššího, než je tlak nasycených par, kde implodují. Při implozi dochází k silným rázovým jevům – voda je vtlačována do krystalické mřížky kovu a poté opět vystřelována ven, přičemž s sebou vytrhává i částičky materiálu. Na povrchu turbíny vzniká typické houbovitě poškození, jež může časem vést až k úplné havárii turbíny. Je tedy nutné vzniku kavitace předcházet. [6] [10]

Nejsnadněji se kavitaci zabrání vyloučením vzniku podtlaků, u přetlakových turbín je však jejich vznik pod oběžným kolem naopak žádoucí, neboť umožňuje lepší využití kinetické energie proudící vody. Konstrukce savky se dokonce buduje za účelem zvýšení podtlaků za turbínou. Kavitaci se tedy předchází omezením nejvyššího přípustného podtlaku. Toto omezení se nejčastěji vyjadřuje ve formě maximální statické sací výšky H_s , která je na vodním díle přípustná. Statická sací výška je rozdíl hladiny dolní vody a kritického místa vodní turbíny (viz obr. 3.5), omezující podmínku lze vyjádřit následovně:

$$H_s \leq H_A - \sigma \cdot H - \frac{P_{nas}}{\gamma} \quad (3.11)$$

kde H_s ... je statická sací výška, H_A ... je atmosférický tlak, σ ... je Thomův kavitační součinitel, H ... užitiný spád na turbíně a $\frac{P_{nas}}{\gamma}$... je tlak nasycených vodních par. [6] [10]

Thomův kavitační součinitel σ se určuje experimentálně a jeho hodnoty jsou dodávány výrobcem jako součást modelové charakteristiky turbíny (viz kapitola 4). Atmosférický tlak se mění s nadmořskou výškou a lze jej určit ze vztahu:

$$H_A = 10 - \frac{h_{nad}}{900} \quad (3.12)$$

kde H_A ... je atmosférický tlak a h_{nad} ... je nadmořská výška. [6] [10]

Kavitační součinitel σ s průtokem roste, pro určení přípustné statické sací výšky by se tedy zdál směrodatný nejvyšší průtok turbínou. S rostoucím průtokem se ovšem snižuje spád. Vhodným řešením se proto jeví výpočet v průtokové řadě (např. m-denních průtoků), kdy je jednotlivým průtokům přiřazena odpovídající hodnota sací výšky H_s a její nejnížší hodnota je rozhodující pro návrh vodní elektrárny. V běžné projekční praxi se navíc hodnota sací výšky snižuje o bezpečnostní rezervu 0.5 až 1 m. Vliv tlaku nasycených vodních par

za běžných provozních teplot se předpokládá za zohledněný touto rezervou. Vzorec (3.11) lze tedy upravit do tvaru:

$$H_s \leq H_A - \sigma \cdot H - 1 \quad (3.13)$$

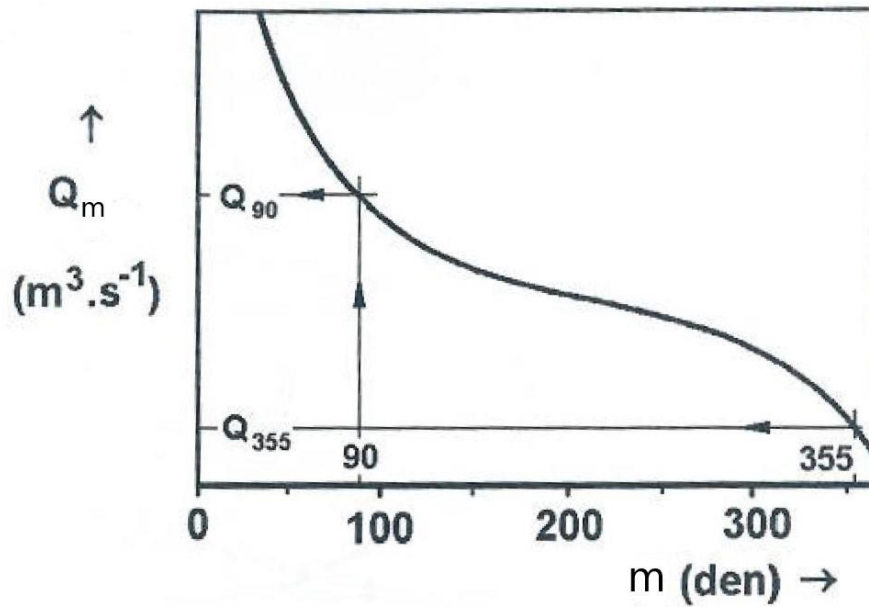
kde H_s ... je statická sací výška, H_A ... je atmosférický tlak, σ ... je Thomův kavitační součinitel a H ... spád na turbíně. [6] [10]

3.8. Výpočet v průtokové řadě

Cennou simulační metodou je řešení v průtokové řadě. Vzorce, uvedené v předcházejících podkapitolách, slouží k vypočtení jednotlivých provozních veličin pro aktuální provozní stav (tedy pro aktuálních průtok ve vodním toku při daných hodnotách jednotlivých parametrů vodní elektrárny). Při výpočtu v průtokové řadě se postupuje tímž způsobem, pouze vstupní veličinou není jeden průtok v toku, nýbrž celý vektor průtoků – průtoková řada. Využitím dříve uvedených vztahů se tedy získají rovněž vektory jednotlivých proměnných, v nichž každý prvek odpovídá aktuální provozní hodnotě dané proměnné.

Pro simulaci na matematickém modelu můžeme využít reálnou průtokovou řadu, či statisticky zpracovanou řadu m -denních průtoků. Při volbě reálné průtokové řady se využijí zaznamenané historické hodnoty průtoků na daném toku za určitý rok. Výsledkem takového řešení jsou hodnoty sledovaných proměnných (např. roční výroby elektrické energie) pro konkrétní rok tak, jako by VD na toku již stálo. Patrnou nevýhodou je, že v takovém případě získáme pouze výsekovou informaci o daném roku. Chceme-li získat rovněž informace pravděpodobnostní povahy, je nutné simulovat více let a poté je zpracovat vhodnými pravděpodobnostními metodami.

Příhodnou alternativou je simulace v průtokové řadě, odpovídající čáře překročení průměrných denních průtoků (m -denních průtoků), která je již výsledkem statistického zpracování průtoků pro konkrétní profil toku. Příklad čáry m -denních průtoků lze nalézt na *obr. 3.6*, a význam je následující: vodorovná osa udává počet dní v roce m , každému z nich je přiřazen jeden průtok Q_m na svislé ose. Průtok Q_m je v daném profilu dosažen či překročen právě m dní v roce. [7] [9]



Obr. 3.6 – Čára překročení m -denních průtoků [9]

Po výpočtu v průtokové řadě lze výsledky zobrazit jako čáry trvání (např. čára trvání spádu, průtoku atd.). Roční výroba elektrické energie se získá časovou integrací čáry trvání výkonů vodní elektrárny (vypočtené dle vzorce 3.10) za jeden rok:

$$E = \int_0^T P \cdot dt \quad (3.14)$$

kde E ... je roční výroba elektrické energie a P ... je skutečný výkon VE dodávaný do sítě. [6]

4. MODELOVÉ CHARAKTERISTIKY TURBÍNY

4.1. Jednotkové veličiny

Vzájemné vztahy mezi základními veličinami turbíny jsou vyjádřeny pomocí turbínových charakteristik. Tyto vztahy se obvykle hledají mezi průtokem turbínou Q , jejím užitným spádem H , otáčkami n , poměrným otevřením lopatek rozváděcího (případně oběžného) kola α , výkonem turbíny P a účinností turbíny η na modelech turbín ve vodohospodářských laboratořích. Modely jsou oproti skutečné turbíně zmenšeny, musí však být dostatečně velké na to, aby byla zachována věrohodnost naměřených dat. Pro přepočet charakteristik z modelu na prototyp vodní turbíny jsou využity zákony hydraulické podobnosti. [2] [6]

Často užívaným konceptem jsou takzvané jednotkové veličiny, sloužící jako nástroj pro porovnávání různých typů turbín bez nutnosti jejich vzájemné hydraulické podobnosti. Jednotkové veličiny jsou získány přepočtem základních hodnot turbíny podle zákonů hydraulické podobnosti na turbínu, pracující při užitném spádu 1 m a průměru oběžného kola 1 m. Jednotkové charakteristiky jsou:

$$n_{11} = \frac{n \cdot D}{\sqrt{H}} \quad (4.1)$$

kde $n_{11} \dots$ jsou jednotkové otáčky, $n \dots$ jsou otáčky turbíny (prototypu), $D \dots$ je průměr oběžného kola turbíny a $H \dots$ je užitný spád turbíny;

$$Q_{11} = \frac{Q}{D^2 \cdot \sqrt{H}} \quad (4.2)$$

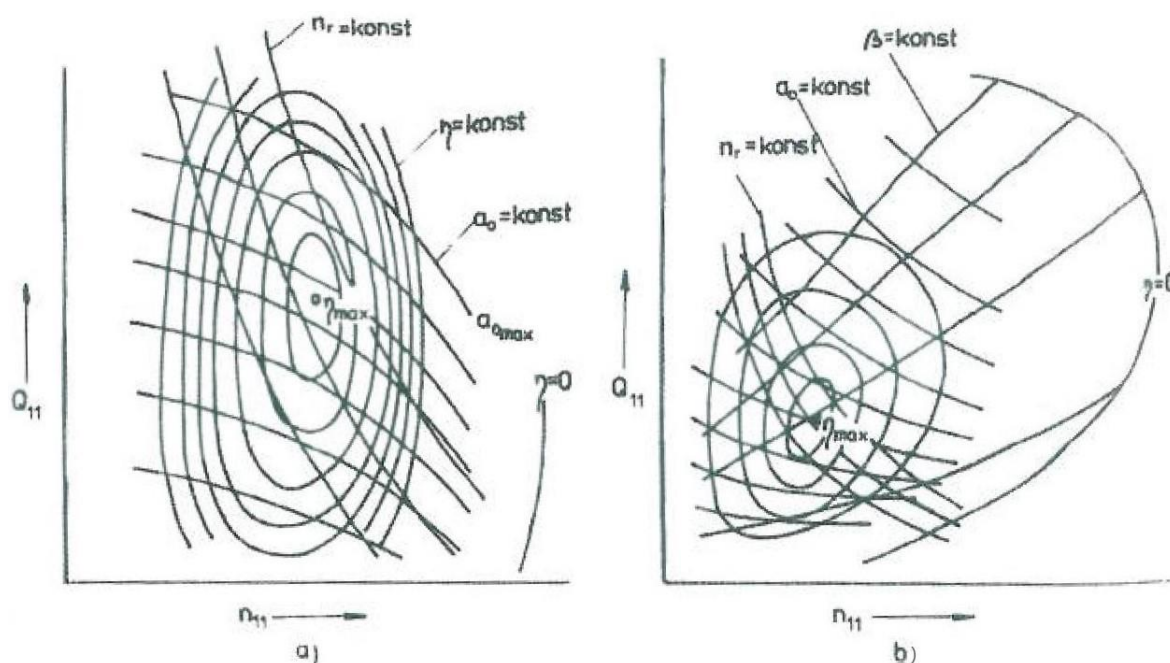
kde $Q_{11} \dots$ je jednotkový průtok, $Q \dots$ je průtok turbínou, $D \dots$ je průměr oběžného kola a $H \dots$ je užitný spád;

$$P_{11} = \frac{P}{D^2 \cdot H^{3/2}} \quad (4.3)$$

kde $P_{11} \dots$ je jednotkový výkon, $P \dots$ je výkon turbíny, $D \dots$ je průměr oběžného kola a $H \dots$ je užitný spád. [6]

4.2. Universální charakteristika

Universální charakteristika turbíny představuje vztah mezi jednotkovým průtokem Q_{11} , jednotkovými otáčkami n_{11} a jejich přidruženými závislými veličinami. Pro znázornění universální charakteristiky se obvykle používá kótované promítání o souřadných osách Q_{11} , n_{11} , do kterých se zanáší přidružené parametry: účinnost η , otevření lopatek rozváděcího kola α , natočení lopatek oběžného kola β , kavitační součinitel σ atd. [8]



Obr. 4.1 – Universální charakteristika: a) Francisovy turbíny, b) Kaplanovy turbíny [1]

Universální charakteristika je sestrojena pomocí rozsáhlých zkoušek na modelové turbíně, její výhodou je možnost použití pro všechny turbíny s geometricky podobnými průtočnými částmi jako má tento model. Pro konkrétní turbínu lze universální charakteristiku přepočítat na charakteristiku provozní. [8] [10]

4.3. Provozní charakteristika

Provozní charakteristika je konkretizací universální charakteristiky pro danou turbínu, tedy při zvoleném průměru oběžného kola D a provozních otáčkách n . Zaznamenává se nad rovinou danou osami průtoku turbínou Q a spádu H , nad níž se vykreslují tytéž přidružené parametry, jako u universální charakteristiky. Transformace universální charakteristiky na provozní se provede pomocí úpravy rovnic (4.1) a (4.2) pro konkrétní hodnotu provozních otáček a průměru oběžného kola následovně:

$$H = \left(\frac{n \cdot D}{n_{11}} \right)^2 \quad (4.4)$$

kde $H...$ je užitný spád, $n...$ jsou provozní otáčky turbíny, $D...$ je průměr oběžného kola a $n_{11}...$ jsou jednotkové otáčky.

$$Q = Q_{11} \cdot D^2 \cdot \sqrt{H} \quad (4.5)$$

kde $Q...$ je průtok turbínou, $Q_{11}...$ je jednotkový průtok, $D...$ je průměr oběžného kola a $H...$ je užitný spád.

5. MODEL V PROSTŘEDÍ MATLAB

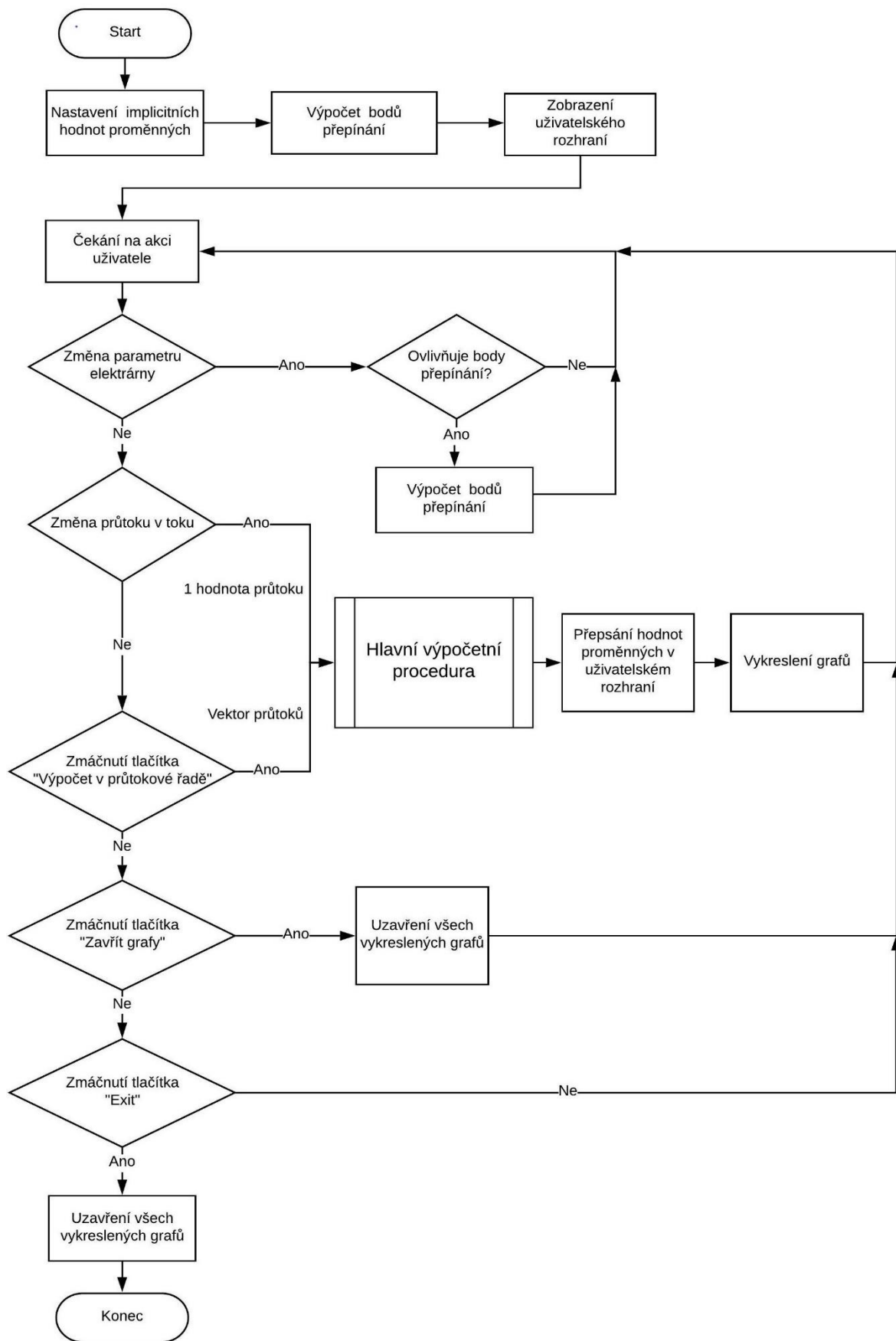
5.1. Základní popis

Matematický model vodní elektrárny je v této diplomové práci zpracován ve školní verzi programu MATLAB od společnosti MathWorks. Pro komunikaci s koncovým uživatelem je využito grafického uživatelského rozhraní vyvinutého v prostředí GUIDE (graphical user interface design environment). Vytvořený model je nahrán na CD, které je nedílnou součástí této diplomové práce.

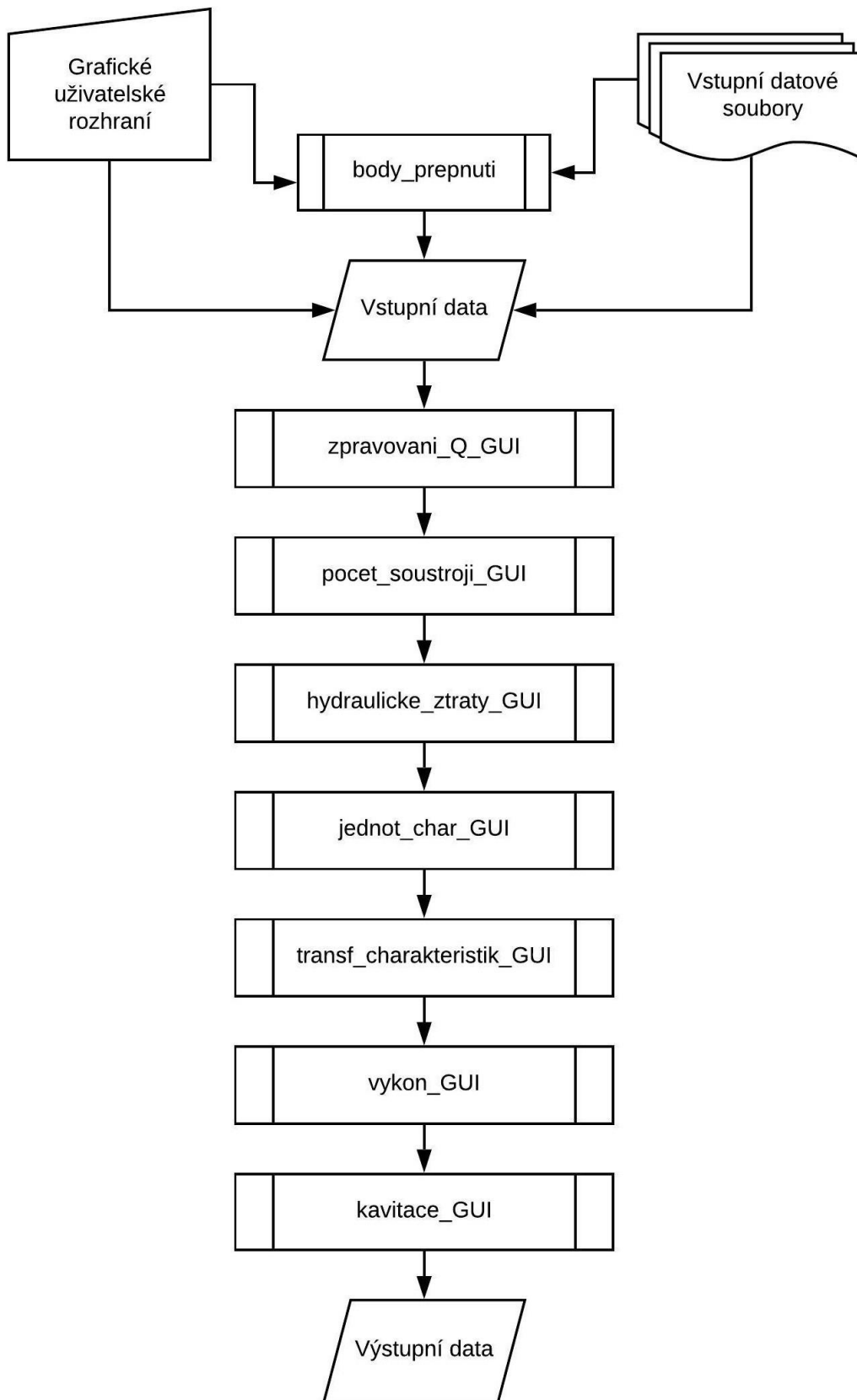
Základní struktura fungování modelu je pro přehlednost znázorněna pomocí vývojového diagramu na *obr. 5.1*. Tento diagram znázorňuje především interakci programu s uživatelem. Hlavní výpočetní procedura modelu je schematizována na *obr. 5.2*, znázorňujícím posloupnost výpočtu. Obsah jednotlivých funkcí je sumarizován v *tab. 5.1* a blíže vysvětlen v následujících podkapitolách.

Před spuštěním modelu je třeba vložit vstupní datové soubory (viz podkapitolu 5.3). Program se doporučuje spouštět otevřením skriptu *GUIDE.m* a zmáčknutím tlačítka „Run“. Po spuštění, ale před samotným zobrazením uživatelského rozhraní, se nastaví implicitní hodnoty proměnných, určené tvůrcem programu a zobrazené v příslušných polích grafického rozhraní. Dále se automaticky vypočtou optimální body přepínání mezi turbínami (více v podkapitole 5.4) a zobrazí se uživatelské rozhraní.

Nyní má uživatel několik možností. Může editovat libovolný parametr vodní elektrárny pomocí polí upravitelného textu. Pakliže tento parametr má vliv na určení bodů přepínání, jsou znovu automaticky přepočítány. Dále může nastavit průtok v toku, a tím spustit hlavní výpočetní proceduru pro aktuální nastavení parametrů elektrárny. Po proběhnutí výpočtu jsou výsledné hodnoty proměnných zapsány do uživatelského rozhraní a vykreslí se příslušné grafy. Zmáčknutím tlačítka *Výpočet v průtokové řadě* se spustí hlavní výpočetní procedura pro vektor průtoků, definovaný v rámci vstupních datových souborů. I v tomto případě jsou vypsány sledované hodnoty proměnných do uživatelského rozhraní a vykresleny grafy. Zmáčknutím tlačítka *Zavřít grafy* jsou všechny aktuálně vykreslené grafy uzavřeny. Po zmáčknutí tlačítka *Exit* jsou rovněž uzavřeny grafy a program se ukončí.



Obr. 5.1 – Vývojový diagram programu



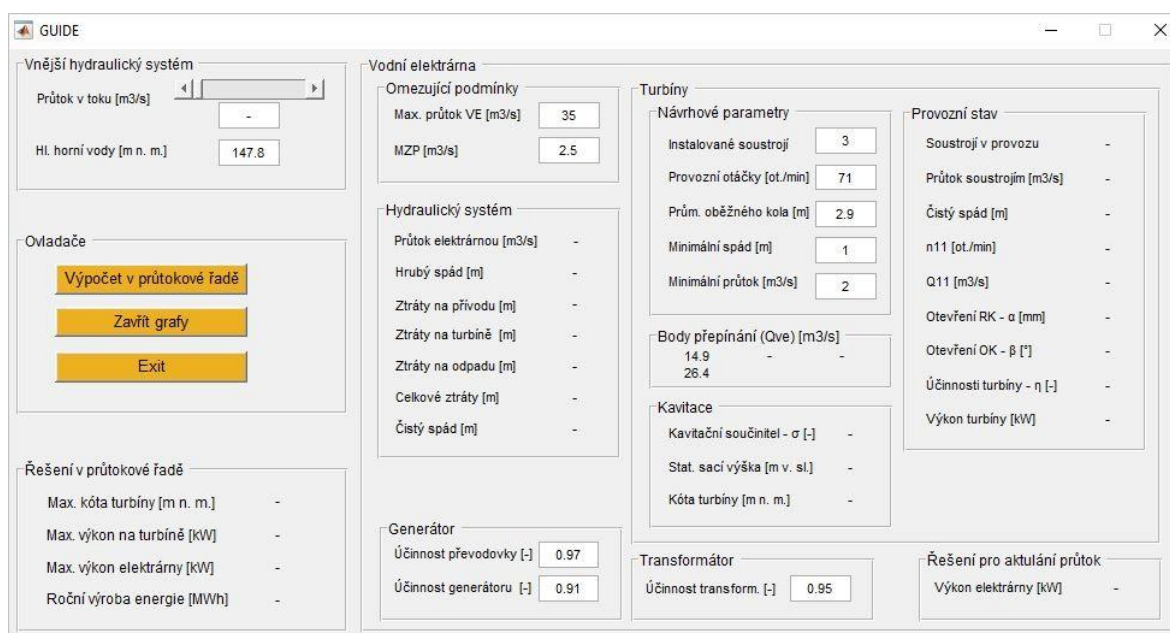
Obr. 5.2 – Hlavní výpočetní procedura modelu

Tab. 5.1 – Obsah dílčích funkcí modelu

Název funkce	Popis
<i>GUIDE.fig</i>	Grafická složka uživatelského rozhraní uchovávající informace o jeho vzhledu.
<i>GUIDE.m</i>	Skript popisující chování jednotlivých komponent uživatelského rozhraní. Program se z něj spouští.
<i>body_prepnuti.m</i>	Přípravná funkce, určující optimální dělení průtoku mezi jednotlivé instalované soustrojí.
<i>zpracovani_Q_GUI.m</i>	Z průtoku ve vodním toku a konzumpční křivky dolní vody vypočte hrubý spád a průtok vodní elektrárnou. Vykreslí jejich hodnoty do grafu.
<i>pocet_soustroji_GUI.m</i>	Z průtoku VE a bodů přepínání určených funkcí <i>body_prepnuti.m</i> zjistí počet soustrojí v provozu a průtok jednou turbínou.
<i>hydraulicke_ztraty_GUI.m</i>	Vypočítá hydraulické ztráty na společném přívodu, na turbíně a společném odpadu elektrárny. Na základě znalosti hrubého spádu a celkových hydraulických ztrát spočítá čistý spád na turbíně.
<i>jednot_char_GUI.m</i>	Určí jednotkové otáčky a jednotkový průtok turbíny. Z univerzální charakteristiky interpoluje aktuální provozní hodnoty účinnosti turbíny, otevření rozváděcího a oběžného kola a kavitačního součinitele. Vykreslí jednotkovou charakteristiku do grafu a vyznačí do ní jednotlivé provozní stavy.
<i>transf_charakteristik_GUI.m</i>	Pře počítá univerzální charakteristiku na provozní, vykreslí ji do grafu a vyznačí do ní provozní stavy. Vykreslí také grafy pomocných vizualizací.
<i>vykon_GUI.m</i>	Spočítá výkon na hřídeli turbíny a celkový výkon VE dodávaný do sítě. Při řešení v průtokové řadě určí roční výrobu elektrické energie, max. dosažený výkon na turbíně i celé elektrárně.
<i>kavitace_GUI.m</i>	Určí hodnotu statické sací výšky a v závislosti na úrovni dolní vody maximální přípustnou polohu turbíny.
<i>cary_trvani_GUI.m</i>	V případě výpočtu v časové řadě vykreslí z výstupních dat jednotlivé čáry trvání.
<i>pocitej_GUI.m</i>	Pomocná funkce, provede výpočet výše popsaných funkcí a zapsání výstupních hodnot do grafického rozhraní.
<i>zavri_grafy.m</i>	Pomocná funkce, zavře všechny aktuálně otevřené grafy.

5.2. Uživatelské rozhraní GUIDE

Grafické uživatelské rozhraní bylo vytvořeno v prostředí GUIDE (graphical user interface design environment) pro snadnější ovládání programu koncovým uživatelem. Rozhraní je definováno pomocí dvou souborů – *GUIDE.fig* a *GUIDE.m*. Soubor *GUIDE.fig* určuje vizuální podobu rozhraní – umístění a vzhled jednotlivých komponent pro zadávání vstupních hodnot, spouštění výpočtu, zobrazování výsledků atd. Soubor *GUIDE.m* obsahuje skript řídicí chování uživatelského rozhraní. Z toho skriptu se program doporučuje spouštět.



Obr. 5.3 – Uživatelské rozhraní GUIDE

Jak patrně z obr. 5.3, uživatelské rozhraní se skládá z několika typů prvků. Upravitelný text (*edit text*) má podobu bílého ohraničeného obdélníku a slouží k zadávání dílčích parametrů vodní elektrárny. Měněním těchto parametrů pro jednotlivé výpočty získává uživatel výstupní data pro různé uspořádání vodní elektrárny, které mohou pomoci při rozhodovacím procesu. Šoupátko (*slider*) určuje vnější podmínku systému – průtok v toku. Aktuální průtok v toku lze rovněž nastavit pomocí pole upravitelného textu, které je s šoupátkem propojeno. Změna průtoku spouští výpočet dle schématu na obr. 5.2 pro dílčí provozní stav. Je tedy možné měnit průtok, a pro dané nastavení parametrů elektrárny sledovat, jakých provozních stavů VE dosahuje, případně změnit určitý parametr a pozorovat jeho vliv na provozní stav. Posledním aktivním prvkem jsou tlačítka (*push button*). Tlačítko *Výpočet v průtokové řadě* spouští výpočet pro průtokovou řadu, tlačítkem *Zavřít grafy* má uživatel možnost uzavřít

všechny aktuálně vykreslené grafy a tlačítko *Exit* program ukončuje. Pasivním prvkem (uživatel jej nemůže editovat) rozhraní je statický text (*static text*), sloužící pro popisy jednotlivých polí a k zobrazování výsledků.

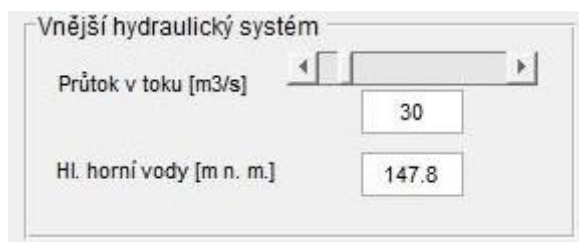
Grafické rozhraní je rozčleněno do logických funkčních celků, jejichž obsah je popsán v následujících podkapitolách.

5.2.1. Vnější hydraulický systém

Blok určuje podmínky systému vně samotnou vodní elektrárnu. Šoupátkem se určuje průtok v toku v rozsahu 0 – 300 m³/s. Kliknutím na šipku je zvolený průtok změněn o 0.25 m³/s, kliknutím do pole šoupátka o 1 m³/s. Aktuálně zvolený průtok se zobrazuje v poli upravitelného textu. Do tohoto pole lze průtok rovněž zadávat, přepsáním hodnoty se šoupátko přesune na příslušnou pozici.

V rámci programu je předpokládán pohyblivý jez a hladina horní vody je uvažována na konstantní hodnotě, kterou může uživatel volit v poli *hl. horní vody*. Hladina dolní vody je proměnlivá v závislosti na průtoku, konzumpční křivka dolní vody však musí být vložena v rámci vstupních datových souborů (viz podkapitolu 5.3), v rozhraní GUIDE se tedy nedefinuje.

Pro měrnou hmotnost vody se v rámci programu zjednodušeně uvažuje konstantní hodnota 1000 kg/m³ a gravitační zrychlení je zohledněno hodnotou 9.81 m/s².



Obr. 5.4 – Blok „Vnější hydraulický systém“

5.2.2. Ovladače

Blok slouží pro snadnější ovládání programu uživatelem, spouští se odtud výpočet v průtokové řadě, zavírají grafy a ukončuje program.



Obr. 5.5 – Blok „Ovladače“

5.2.3. Vodní elektrárna

Blok *Vodní elektrárna* je nejobsáhlejší. Představuje celý vnitřní systém VE a je rozčleněn do několika dílčích bloků, představující jednotlivé technologické zařízení, případně jiný logický celek.

Omezující podmínky	
Max. průtok VE [m3/s]	35
MZP [m3/s]	2.5

Hydraulický systém	
Průtok elektrárnou [m3/s]	27.50
Hrubý spád [m]	2.760
Ztráty na přívodu [m]	0.050
Ztráty na turbíně [m]	0.011
Ztráty na odpadu [m]	0.033
Celkové ztráty [m]	0.094
Čistý spád [m]	2.666

Generátor	
Účinnost převodovky [-]	0.97
Účinnost generátoru [-]	0.91

Turbíny	
Návrhové parametry	
Instalované soustrojí	3
Provozní otáčky [ot./min]	71
Prům. oběžného kola [m]	2.9
Minimální spád [m]	1
Minimální průtok [m3/s]	2
Body přepínání (Qve) [m3/s]	
14.9	-
26.4	-
Kavitace	
Kavitační součinitel - σ [-]	0.153
Stat. sací výška [m v. sl.]	8.427
Kóta turbíny [m n. m.]	153.47

Provozní stav	
Soustrojí v provozu	3
Průtok soustrojím [m3/s]	9.17
Čistý spád [m]	2.666
n11 [ot./min]	126.11
Q11 [m3/s]	0.668
Otevření RK - α [mm]	15.40
Otevření OK - β [°]	-5.83
Účinnosti turbíny - η [-]	0.872
Výkon turbíny [kW]	209.0

Transformátor	
Účinnost transform. [-]	0.95

Řešení pro aktuální průtok	
Výkon elektrárny [kW]	525.8

Obr. 5.6 – Blok „Vodní elektrárna“

Blok *Omezující podmínky* představuje vnější limity, jimiž je provoz elektrárny podmíněn. Maximální průtok VE může být stanoven povolením k odběru povrchových vod či jiným omezením. Pokud není jeho hodnota vnějšími vlivy vynucena, jde o jeden z parametrů, jenž může být optimalizován. Tato hodnota se zároveň v rámci modelu považuje za návrhový průtok VE. Požadavky na ostatní odběry z toku s vyšší prioritou jsou v modelu generalizovány polem *MZP* (minimální zůstatkový průtok).

Blok *Hydraulický systém* slouží pouze k vypisování výsledků. Po proběhlé simulaci pro aktuální provozní stav jsou do něj zapisovány hodnoty průtoku elektrárnou, hrubého spádu, hydraulických ztrát na společném přívodu, na turbíně a společném odpadu, celkové hydraulické ztráty a čistý spád.

Blok *Turbíny* představuje všechny informace o tomto technologickém zařízení, je dále rozčleněn na dílčí sledované jevy.

Blok *Návrhové parametry* zahrnuje všechny parametry turbín, které může uživatel editovat, a tedy i optimalizovat. V poli *Instalované soustrojí* se volí počet turbín instalovaných na VE, předpokládá se užití totožných strojů. Na vodní elektrárně se uvažuje použití převodovky, není tedy nutné volit synchronní provozní otáčky, pro tento parametr je možné zvolit libovolnou hodnotu v poli *Provozní otáčky*. Pole *Prům. oběžného kola* určuje velikost instalovaných turbín. Pole *Minimální spád* a *Minimální průtok* vymezují nejmenší spád a průtok, za nichž je turbína ještě schopna pracovat.

Do bloku *Body přepínání* se při každém automatickém výpočtu zapisují body přepínání, tedy specifické průtoky VE, jimiž je určeno dělení průtoku mezi jednotlivé soustrojí.

Blok *Provozní stav* zobrazuje hodnoty proměnných, týkajících se aktuálního provozního stavu na turbíně. Jmenovitě: počet soustrojí v provozu, průtok jedním soustrojím, čistý spád na turbíně, jednotkové otáčky n_{11} , jednotkový průtok Q_{11} , otevření rozváděcího a oběžného kola, účinnost turbíny a výkon na hřídeli turbíny.

Do bloku *Kavitace* se zaznamenává hodnota kavitačního součinitele, statické sací výšky a maximální přípustné kóty turbíny pro bezkavitační provoz při aktuálním provozním stavu.

V bloku *Generátor* může uživatel volit účinnost instalované převodovky a generátoru. Pakliže je zvolena účinnost převodovky v hodnotě 1, v simulované elektrárně není

převodovka použita a generátor je na společné hřídeli s turbínou. V tomto případě je ovšem nutné zvolit synchronní provozní otáčky turbíny.

V bloku *Transformátor* může uživatel volit účinnost instalovaného transformátoru na vyšší napětí.

Do bloku *Řešení pro aktuální průtok* se zapisuje výkon vodní elektrárny pro aktuální provozní stav.

5.2.4. Řešení v průtokové řadě

Do bloku *Řešení v průtokové řadě* se zapisují výsledky po provedení výpočtu v průtokové řadě. Oproti bloku *Vodní elektrárna*, který zobrazuje hodnoty proměnných pro aktuální provozní stav, zobrazuje tento blok hodnoty získané z celé průtokové řady. Jde tedy o nejpodstatnější výsledky z hlediska technickoekonomického zhodnocení daného uspořádání VE, neboť jde o hodnoty kritické, či jinak významné.

Pole *Max. kóta turbíny* určuje maximální přípustnou kótu, na níž je možné umístit turbínu, aby byl zajištěn bezkavitační provoz. Maximální výkon na turbíně a VE určuje výkon, na něž musí být dimenzovány související technické zařízení. Tyto tři proměnné představují limity, kterými je nutné se při projektování elektrárny řídit, podmiňují tedy investiční náklady. Naproti tomu proměnná *Roční výroba energie* představuje zisk, který bude investorovi z hotového díla plynout.

Řešení v průtokové řadě	
Max. kóta turbíny [m n. m.]	152.78
Max. výkon na turbíně [kW]	362.8
Max. výkon elektrárny [kW]	635.2
Roční výroba energie [MWh]	3790.7

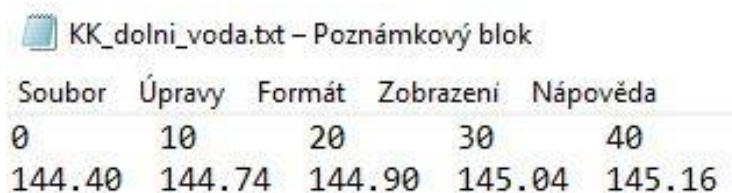
Obr. 5.7 – Blok „Řešení v průtokové řadě“

5.3. Vstupní datové soubory

Některá vstupní data, popisující danou lokalitu a instalovaný typ turbíny, nejsou specifikována pomocí uživatelského rozhraní. Musí být vložena ve formě datových souborů přímo ve složce, ve které jsou umístěny i skripty funkcí matematického modelu. Požadavky na tyto soubory jsou specifikovány v následujícím textu. Pakliže jsou vstupní datové soubory jakkoliv změněny, vždy se důrazně doporučuje program restartovat.

5.3.1. Konzumpční křivka dolní vody

Soubor s názvem *KK_dolni_voda.txt* popisuje závislost hladiny dolní vody na průtoku ve vodoteči. V prvním řádku jsou vypsány hodnoty průtoku [m³/s], ve druhém jim odpovídající kóty hladiny dolní vody [m n. m.]. Program mimo rozsah zadaných hodnot neextrapoluje.



Soubor	Úpravy	Formát	Zobrazení	Nápověda
0	10	20	30	40
144.40	144.74	144.90	145.04	145.16

Obr. 5.8 – Vstupní datový soubor *KK_dolni_voda.txt*

5.3.2. Závislost hydraulických ztrát na průtoku

Závislost ztrátové výšky na průtoku je třeba specifikovat pomocí textového souboru *Hztr.txt*. Toto řešení je voleno z důvodu snahy o co největší universálnost programu. Soubor musí obsahovat 4 sloupce, první představuje průtok [m³/s], druhý ztrátovou výšku na společném přívodu [m v. sl.] v závislosti na **průtoku VE** odpovídající prvnímu sloupci, třetí ztrátovou výšku na turbíně [m v. sl.] v závislosti na **průtoku turbínou** specifikovaném v prvním sloupci a čtvrtý ztrátovou výšku na společném odpadu [m v. sl.] v závislosti na **průtoku VE**. Požadovaná struktura je znázorněna v *tab. 5.2*. Program mimo rozsah zadaných hodnot neextrapoluje. Pro kontrolu je závislost vykreslena do grafu při spuštění programu.

Tab. 5.2 – Požadovaná struktura datového souboru *Hztr.txt*

Q _{VE/turbína} [m ³ /s]	H _{ztr_přívod} = f(Q _{VE}) [m v. sl.]	H _{ztr_turbína} = f(Q _{turbína}) [m v. sl.]	H _{ztr_odpad} = f(Q _{VE}) [m v. sl.]
0	0.0000	0.00000	0.00000
1	0.00006	0.00023	0.00005
2	0.00026	0.00092	0.00019
3	0.00058	0.00207	0.00042

5.3.3. Universální charakteristika turbíny

Universální charakteristiku turbíny je třeba specifikovat v několika souborech typu *.mat* (matice v prostředí MATLAB), viz *tab. 5.3*. Soubory *n11_inp.mat* a *Q11_inp.mat* určují rovinu jednotkových otáček a průtoku, nad nimiž je určena třetí závislá proměnná (účinnost, otevření RK, OK a kavitační součinitel). Tedy např. hodnoty účinnosti v prvním řádku a sloupci matice *eta_inp.mat* je dosaženo při jednotkových otáčkách na téže pozici matice *n11_inp.mat* a jednotkovém průtoku na téže pozici matice *Q11_inp.mat*. Všechny matice určující universální charakteristiku turbíny musí mít tentýž rozměr a musí obsahovat body pravidelné obdélníkové sítě.

Program dokáže extrapolovat hodnoty závislých proměnných mimo rozsah vložené universální charakteristiky. Jsou-li však zjišťované body příliš vzdálené zadanému rozsahu matic, mohou extrapolované veličiny dosahovat nesmyslných hodnot. Toho je třeba mít při využívání programu na paměti a důsledně kontrolovat, zda extrapolace neovlivní spolehlivost výpočtu.

Tab. 5.3 – Datové soubory určující universální charakteristiku turbíny

Název souboru	Obsah
<i>n11_inp.mat</i>	Matice jednotkových otáček
<i>Q11_inp.mat</i>	Matice jednotkových průtoků
<i>eta_inp.mat</i>	Matice účinností
<i>a0_inp.mat</i>	Matice otevření rozváděcího kola
<i>beta_inp.mat</i>	Matice otevření oběžného kola
<i>sigma_inp.mat</i>	Matice kavitačního součinitele

5.3.4. Průtoková řada

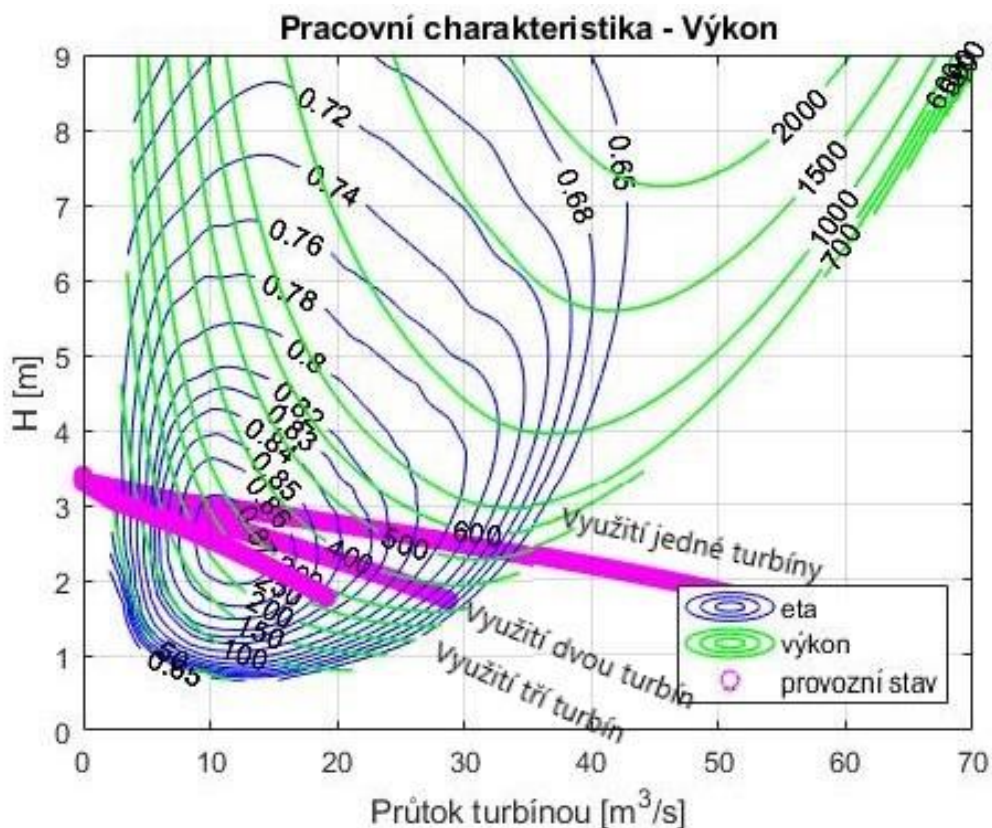
Při výpočtu v průtokové řadě je třeba vložit do složky programu textový soubor *Q.txt*, obsahující jeden sloupec s průtoky v [m³/s]. Pro čáru překročení m-denních průtoků musí být tato řada sestupně seřazena, reálná průtoková řada může být zadána i v chronologickém pořadí (simulace reálného provozu elektrárny v daném roce). V tomto případě číslo *m* v čárách trvání neodpovídá m-dennosti, nýbrž pořadovému číslu daného dne v roce.

5.4. Body přepínání

Body přepínání stanovují způsob dělení průtoku mezi jednotlivé turbíny. Pro n instalovaných soustrojí je určeno $(n-1)$ průtoků vodní elektrárnou, které jej rozdělují na n intervalů. V prvním intervalu je v provozu jedno soustrojí, po překročení prvního přepínacího bodu najíždí do provozu druhé soustrojí a analogicky jsou zapojovány i ostatní stroje.

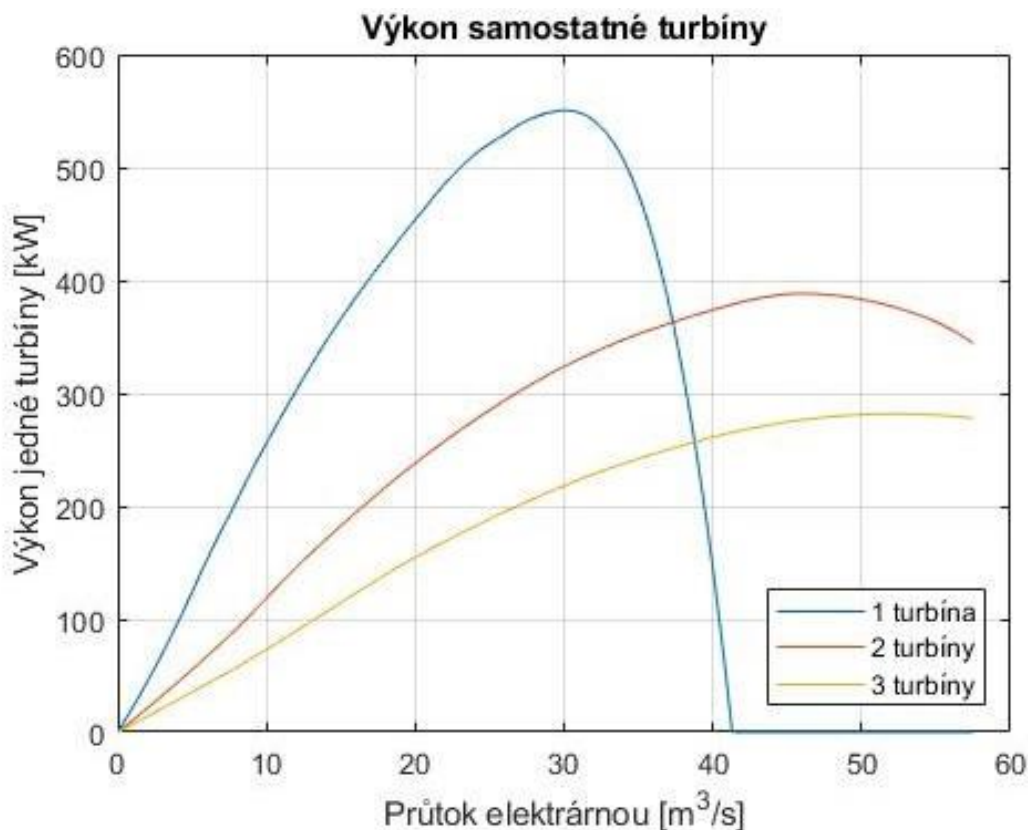
V raných fázích vývoje programu bylo použito přepínacích bodů ve formě fixně daných maximálních průtoků turbínou dle vzorce (3.4), doporučených odbornou literaturou. Bylo však zjištěno, že takovýto způsob dělení průtoku není optimální z hlediska celkového výkonu vodní elektrárny. Prostředí MATLAB nabízí možnost nalezení vhodnějších bodů přepínání, jenž je popsán v následujícím textu a zahrnut do programu.

Pro vektor všech předpokládaných průtoků v toku (s krokem $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$) je provedeno n simulací (kde n je počet instalovaných turbín). Při první simulaci je pro celý rozsah průtoků využíváno pouze jedné turbíny, při druhé simulaci turbín dvou atd. až po n -tou simulaci. Příklad pro tři instalované soustrojí lze vidět obr. 5.9.



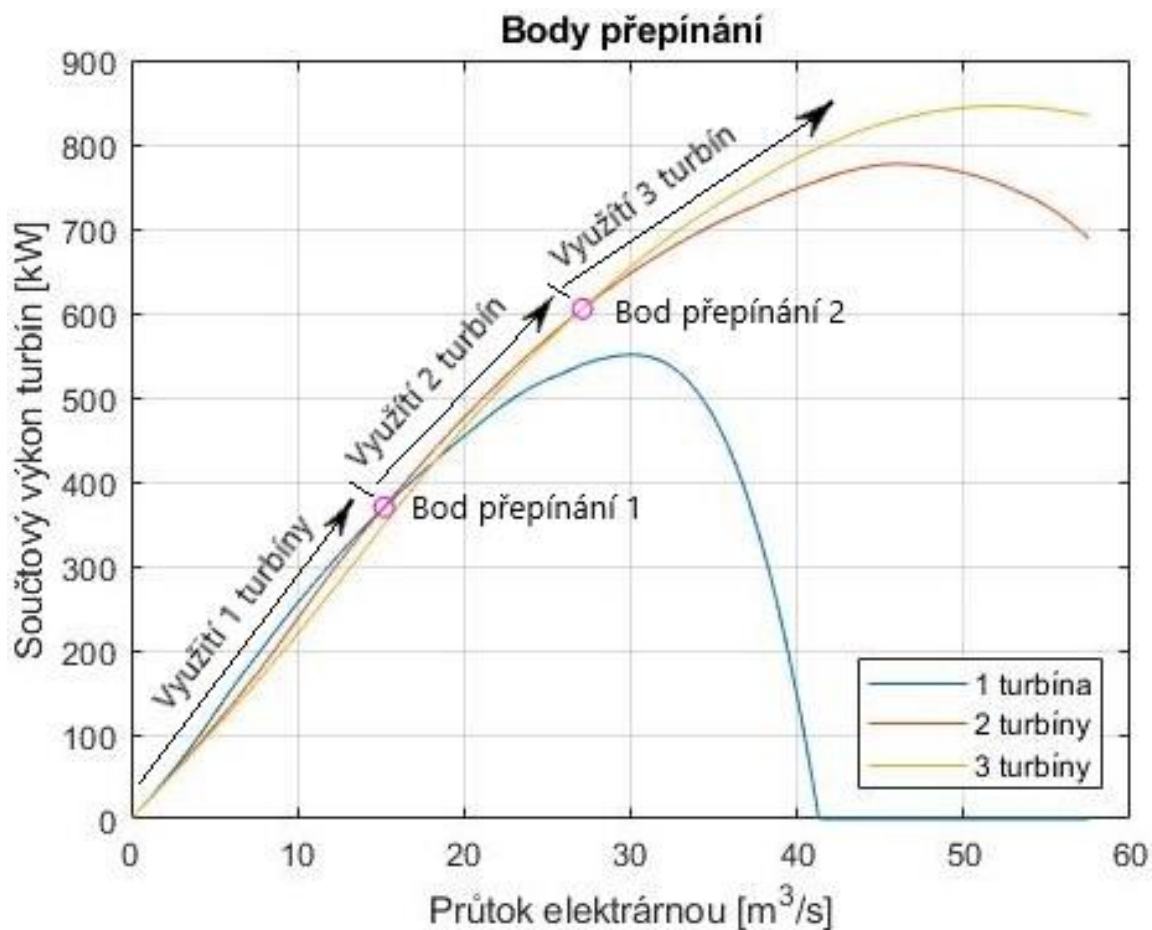
Obr. 5.9 – Určení přepínacích bodů – simulace pro tři soustrojí

Pro každou simulaci lze pro vektor průtoků získat jemu odpovídající vektor skutečných výkonů turbíny, vypočtených dle vztahu (3.1) v kombinaci se vzorcem (3.7). Výkony turbíny lze vykreslit v závislosti na průtoku vodní elektrárnou. Jak patrně z *obr. 5.10*, čím více turbín je využíváno, tím nižšího maximálního výkonu na turbíně je dosaženo, ale rovněž je pozvolnější jeho pokles.



Obr. 5.10 – Určení přepínacích bodů – výkon na turbíně

Vynásobíme-li dílčí vektor výkonů turbíny počtem využívaných turbín a vykreslíme-li jej nad průtok elektrárnou, dostaneme *obr. 5.11*. Z něj je patrné získání přepínacích bodů. Až po určitý průtok vodní elektrárnou je nejvyššího součtového výkonu turbín dosaženo provozem pouze jedné turbíny. Po překročení tohoto průtoku je již vyššího součtového výkonu dosaženo provozem dvou turbín. Tento průtok je označen jako bod přepínání 1 a určuje průtok VE, při němž je přepínáno mezi provozem jedné a dvou turbín. Obdobně se postupuje pro zbylé body přepínání. Zpětně jsou body přepínání vyznačeny rovněž do obrázku *obr. 5.10*.



Obr. 5.11 – Určení přepínacích bodů – součtový výkon turbín

Body přepínání jsou automaticky vypočteny při spuštění programu i editaci jakéhokoliv pole uživatelského rozhraní, mající vliv na jejich hodnotu. Při změně vstupních datových souborů (viz podkapitolu 5.3) je nutné program restartovat.

V konkrétním případě, zobrazeném na obr. 5.9 – 5.11, dochází v oblasti nejnižších průtoků k extrapolaci hodnot účinnosti a tím k mírnému zkreslení. Křivky výkonu na obr. 5.10 a obr. 5.11 prochází bodem (0,0), ve skutečnosti však výkon protíná osu x v nenulové hodnotě průtoku. Toto zkreslení ovšem nemá na určení bodů přepínání vliv a je zanedbatelné.

5.5. Zpracování průtoku

Vstupy funkce *zpracovani_Q_GUI.m* jsou konzumpční křivka dolní vody, úroveň hladiny horní vody, MZP, max. průtok VE (tedy návrhový průtok) a průtok v toku. Skript z hladiny horní vody a konzumpční křivky určí závislost hrubého spádu na průtoku. Hrubý spád při návrhovém průtoku elektrárnou označí za návrhový spád (tedy spád při průtoku ve vodním toku odpovídající hodnotě $Q = \text{max. průtok VE} + \text{MZP}$). Poté dle aktuálního průtoku v toku určí hladinu dolní vody, hrubý spád a dle rovnice (3.3) průtok vodní elektrárnou.

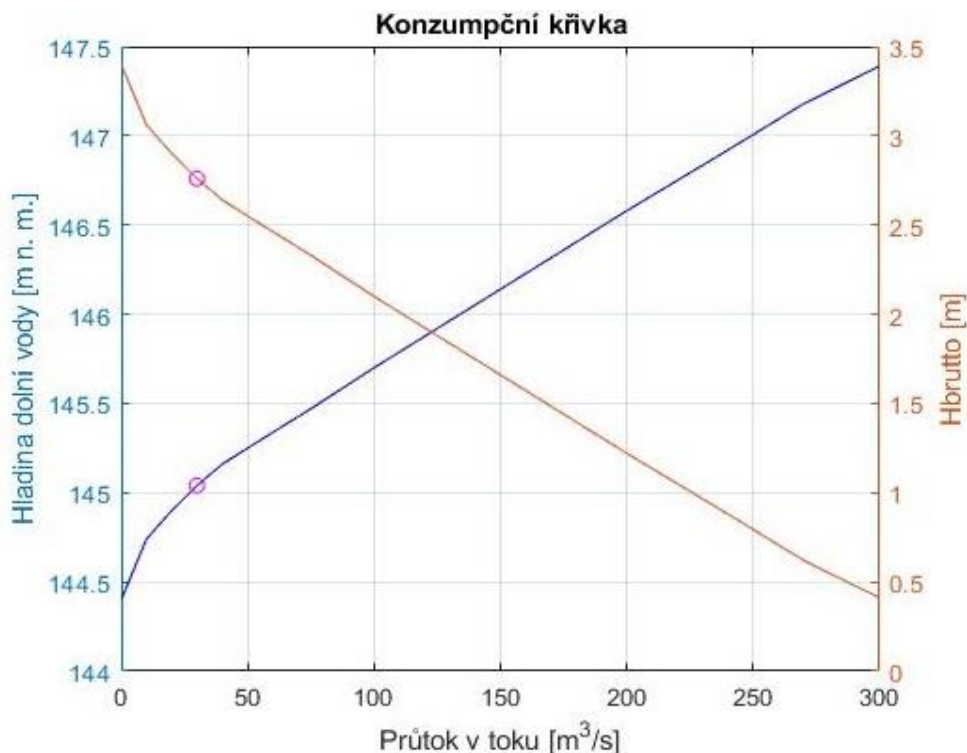
S rostoucím průtokem však klesá H_{brutto} . Při vyšších průtocích, než je návrhový tedy nelze udržet průtok VE na konstantní hodnotě z důvodu úbytku spádu. Průtok vodní elektrárnou je tedy upraven podmínkou (5.1).

$$\text{if } H_{\text{brutto}} < H_{\text{návrhový}} \quad (5.1)$$

$$Q_{ve} = Q_{ve} \cdot (H_{\text{brutto}} / H_{\text{návrhový}})^{0.5}$$

kde $H_{\text{brutto}} \dots$ je hrubý spád a $H_{\text{návrhový}} \dots$ je návrhový spád (odpovídající spádu při návrhovém průtoku) a $Q_{ve} \dots$ je průtok vodní elektrárnou.

Konzumpční křivka a závislost H_{brutto} na průtoku je vykreslena do grafu a do něj je vyznačen aktuální provozní stav.



Obr. 5.12 – Zpracování průtoku – konzumpční křivka dolní vody

5.6. Počet soustrojí v provozu

Skript *pocet_soustroji_GUI.m* potřebuje znát body přepínání, automaticky vypočítané v rámci funkce *body_prepnuti.m* (viz podkapitolu 5.4) a minimální průtok turbínou. Pro průtok vodní elektrárnou aplikuje podmínku (3.5) a pomocí bodů přepínání určí aktuální počet turbín v provozu. Vydělením průtoku VE počtem turbín v provozu získá průtok turbínou.

5.7. Hydraulické ztráty

Pro určení čistého spádu na turbíně je využita rovnice (3.6). Vliv rychlostních výšek na vstupním a výstupním profilu se předpokládá jako zanedbatelný, ve výpočtu se tedy neuvažuje. Celkové hydraulické ztráty jsou ve výpočtu rozděleny na ztráty na přívodu, na turbíně a na odpadu. Přívod a odpad se předpokládá společný pro všechny turbíny, hydraulické ztráty tedy určuje celkový průtok vodní elektrárnou. Ztráty na turbíně jsou podmíněny průtokem turbínou.

Funkce *hydraulicke_ztraty_GUI.m* dle průtoku vodní elektrárnou a turbínou interpoluje z datového souboru *Hztr.txt* (viz podkapitolu 5.3.2) hydraulické ztráty na přívodu, na turbíně a na odpadu. Jejich odečtením od hrubého spádu získá čistý spád. Pro něj je dále aplikována podmínka:

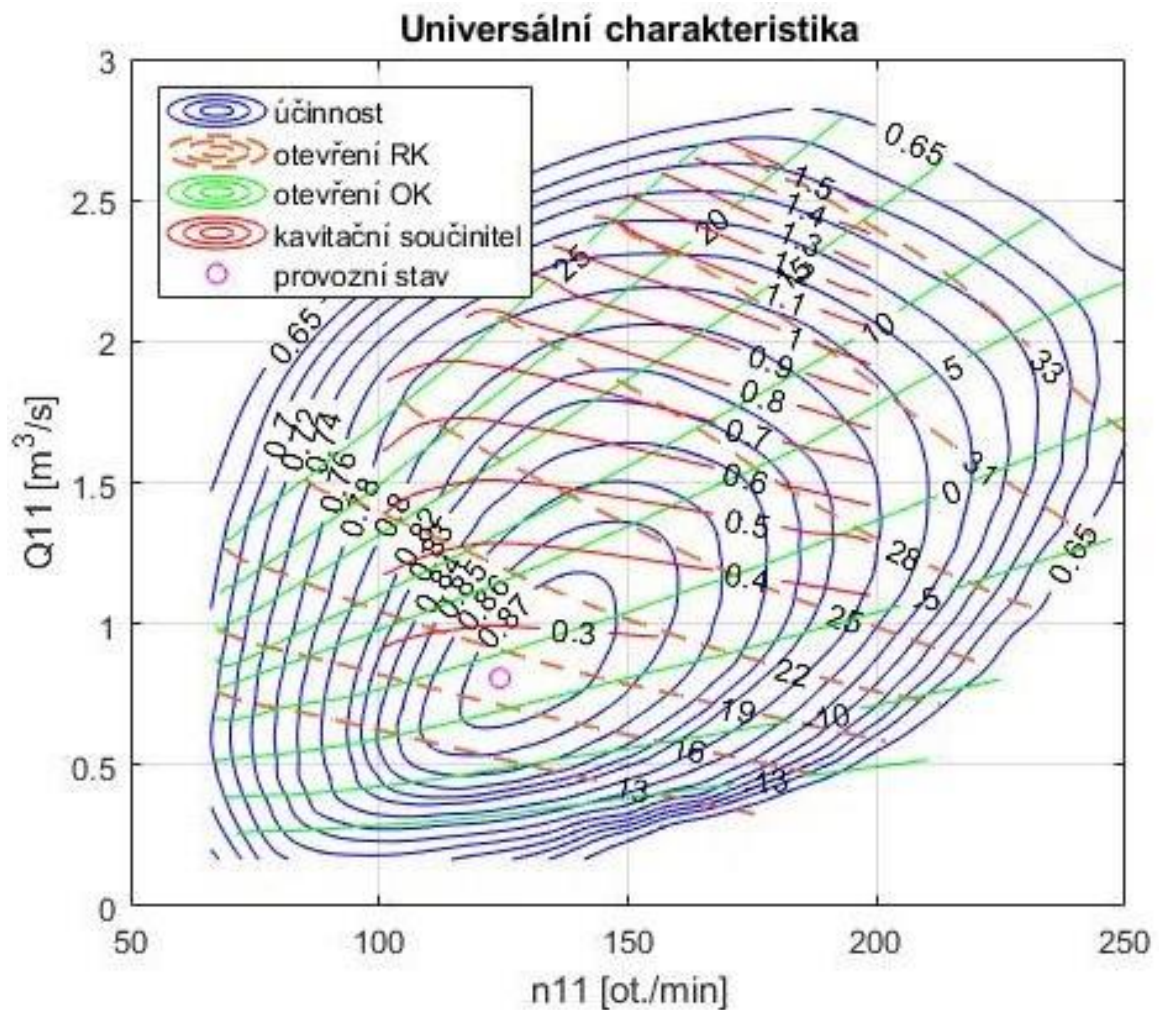
$$\text{if } H < H_{min} \quad (5.2)$$

$$H = 0$$

kde $H...$ je čistý spád na turbíně a $H_{min}..$ je minimální zpracovatelný spád, definovaný v rámci uživatelského rozhraní.

5.8. Universální charakteristika

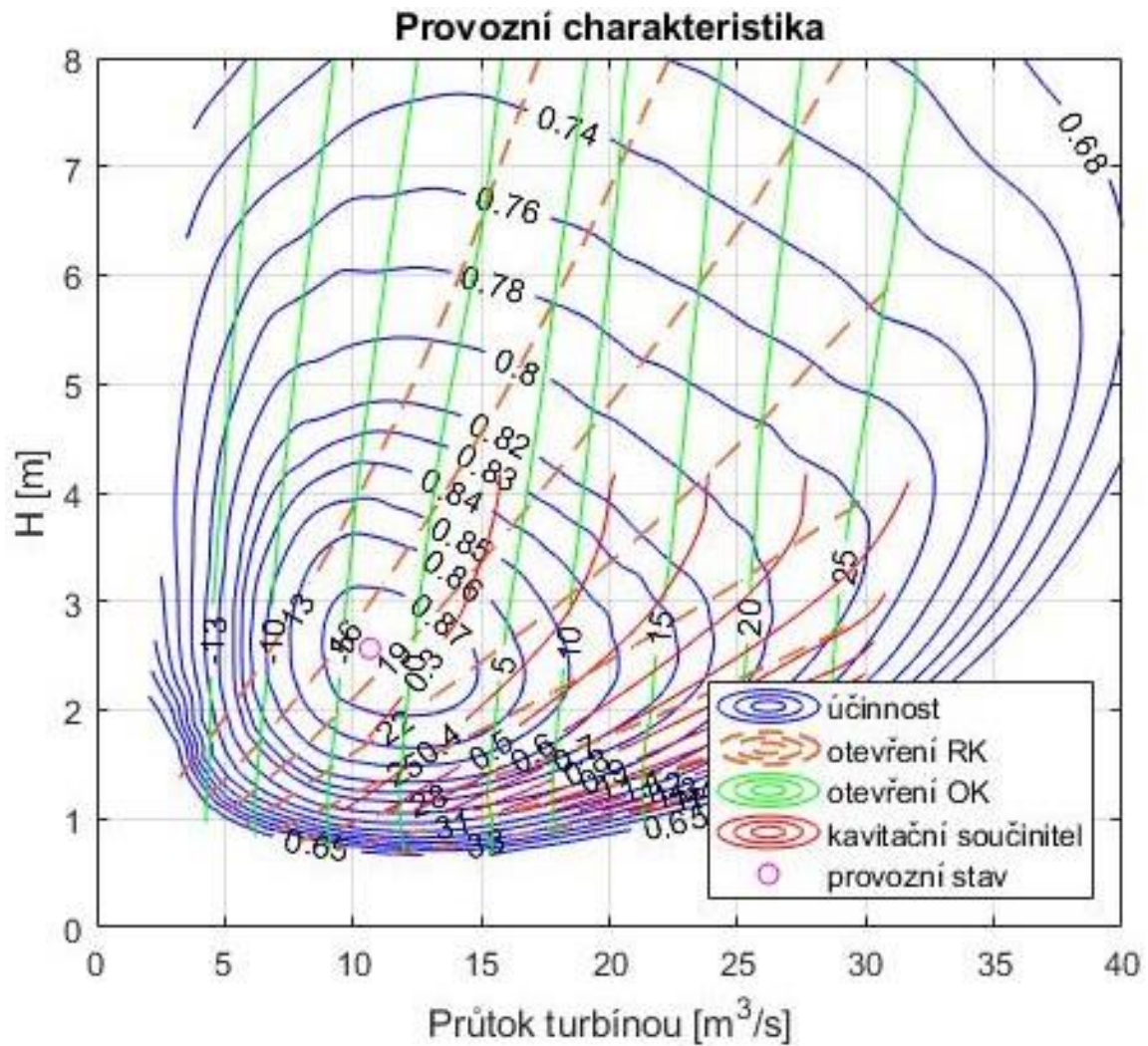
Skript *jednot_char_GUI.m* určí pomocí vzorců (4.1) a (4.2) aktuální jednotkové otáčky a jednotkový průtok turbíny. Načte matice, specifikující universální charakteristiku turbíny (více v podkapitole 5.3.3) a dle aktuálních jednotkových otáček a průtoku interpoluje aktuální provozní hodnoty turbíny – účinnost η , otevření rozváděcího kola α , otevření oběžného kola β a kavitační součinitel σ . Universální charakteristiku poté vykreslí do grafu a vyznačí do ní aktuální provozní stav.



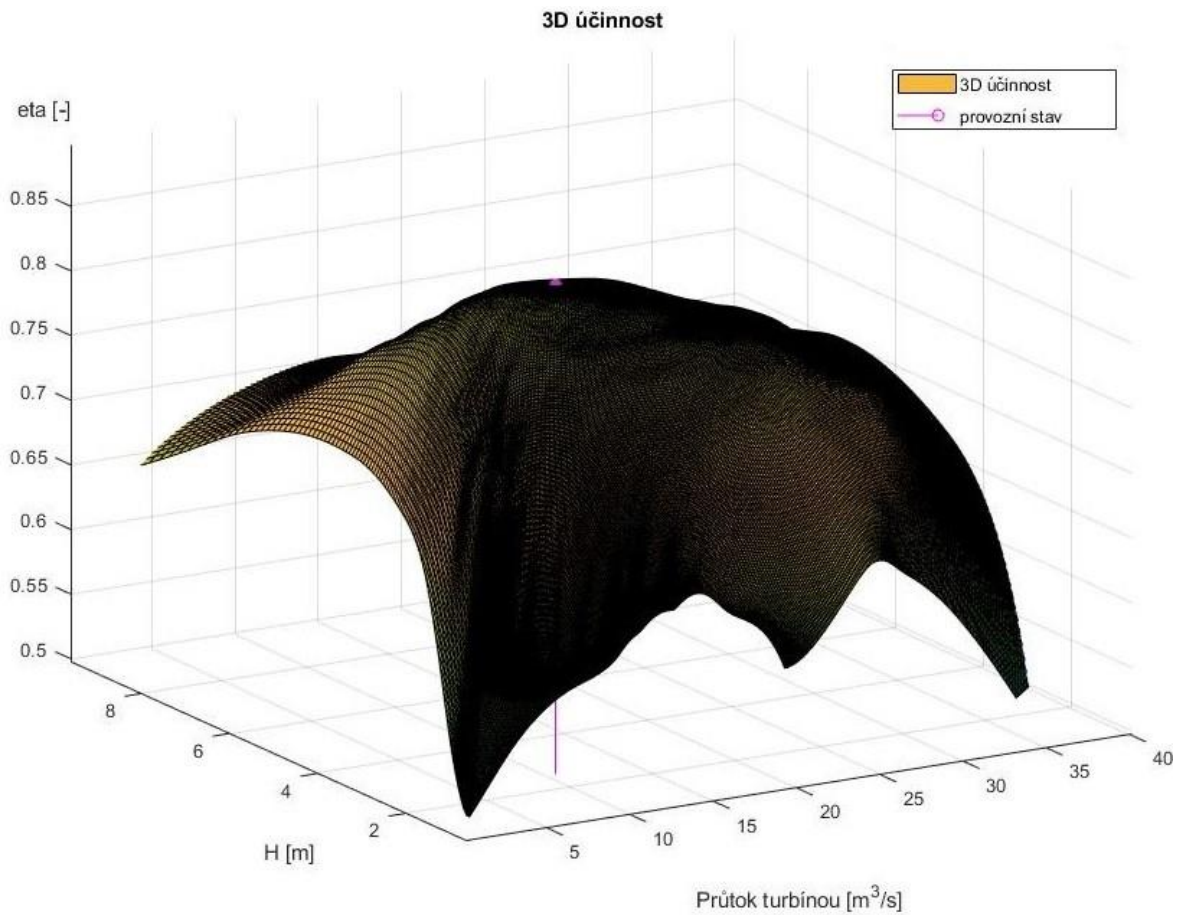
Obr. 5.13 – Universální charakteristika turbíny

5.9. Provozní charakteristika

V rámci funkce *transf_charakteristik_GUI.m* je pomocí rovnic (4.4) a (4.5) universální charakteristika transformována na charakteristiku provozní. Provozní charakteristika je vykreslena do grafu a je do ní vyznačen aktuální provozní stav. Pro lepší vizualizaci je účinnost turbíny rovněž vykreslena jako prostorová plocha nad rovinou Q-H (průtok turbínou – užitný spád) a i do ní je vyznačen provozní stav.

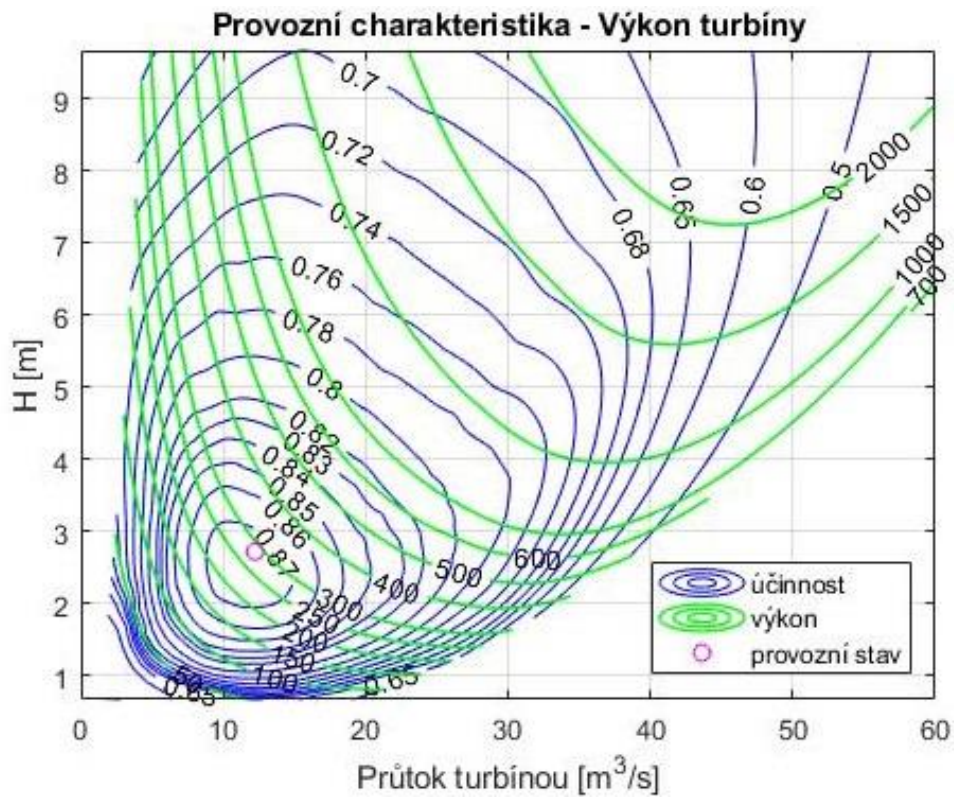


Obr. 5.14 – Provozní charakteristika turbíny

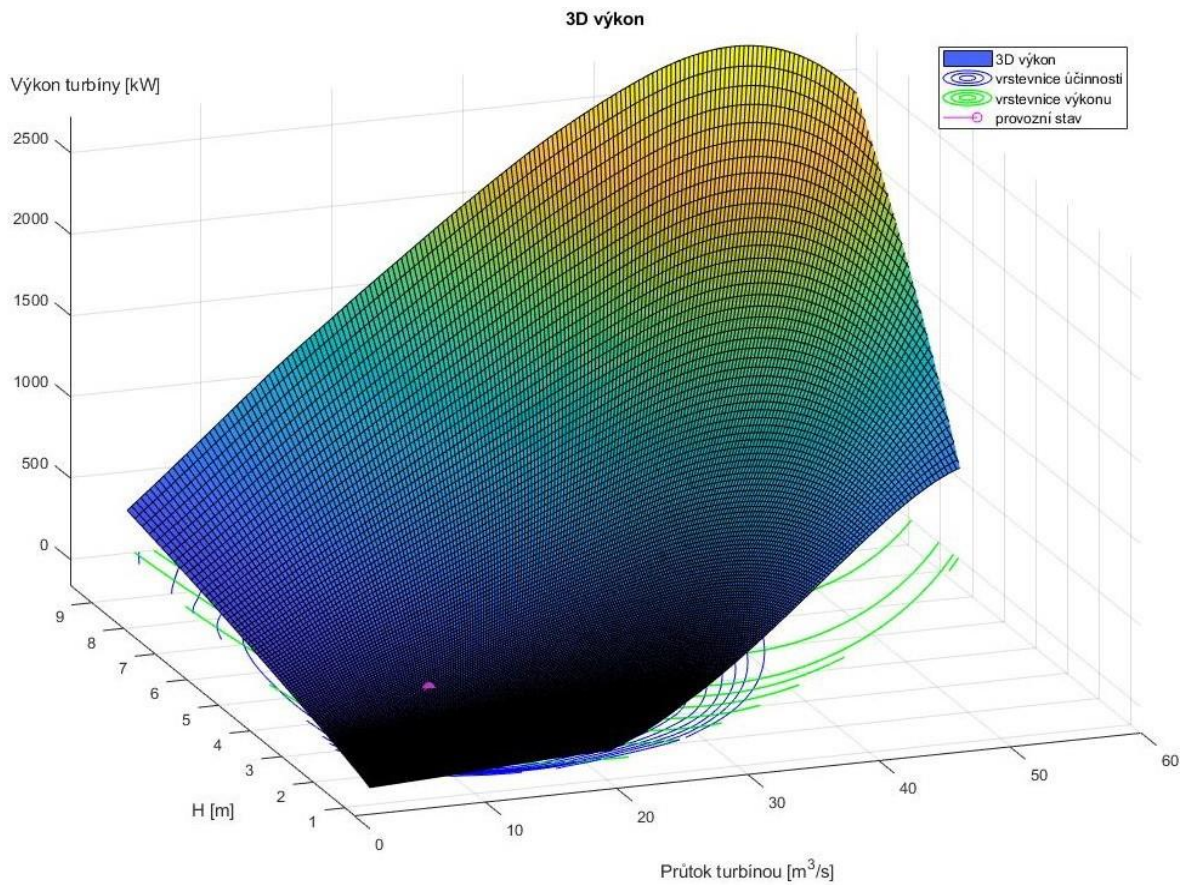


Obr. 5.15 – Prostorové vykreslení účinnosti turbíny

Pomocí rovnic (3.1) a (3.7) je nad rovinou Q-H vypočtena matice skutečných výkonů turbíny a je vykreslena jako dvojrozměrný vrstevnicový graf i jako prostorová plocha (do obou jsou pro lepší názornost rovněž vyznačeny vrstevnice účinnosti). I v těchto grafech je zakreslen aktuální provozní stav.



Obr. 5.16 – Vrstevnicový graf výkonu turbíny



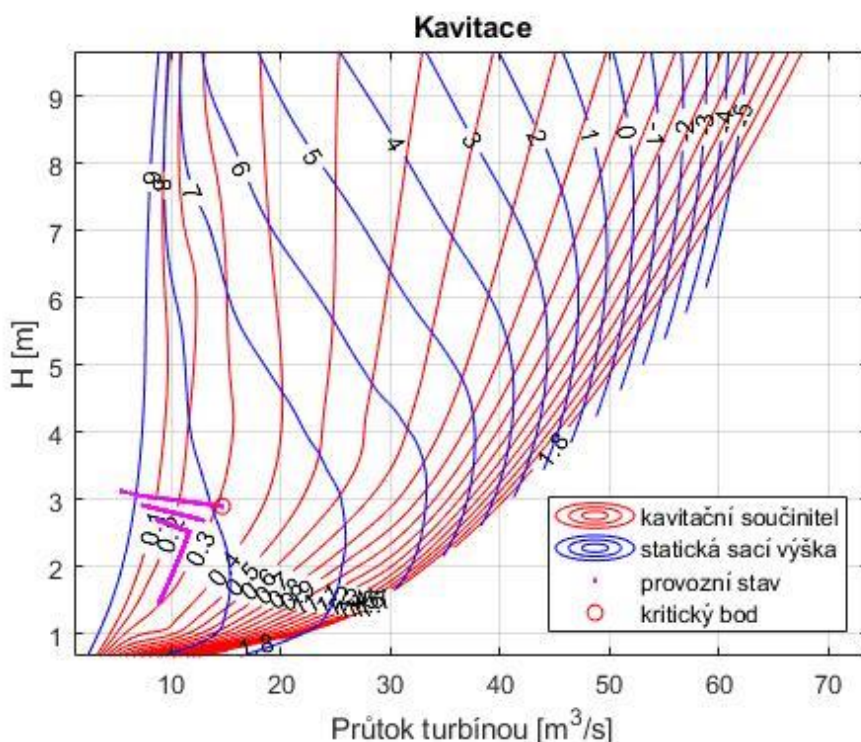
Obr. 5.17 – Prostorové vykreslení výkonu turbíny

5.10. Výkon vodní elektrárny

V rámci skriptu *vykon_GUI.m* je pomocí rovnic (3.1) a (3.7) určen aktuální výkon turbíny. Pro zvolené hodnoty účinnosti převodovky, generátoru a transformátoru, specifikované v rámci uživatelského rozhraní, je dle rovnice (3.10) vyjádřen výkon VE dodávaný do sítě. V případě výpočtu v časové řadě je určen max. dosažený výkon na turbíně a VE, pomocí integrace výkonů VE je také určena roční výroba elektrické energie (vzorec (3.14)).

5.11. Kavítace

Funkce *kavitace_GUI.m* určí dle rovnice (3.13) pro aktuální hodnotu užitého spádu a kavitačního součinitele σ maximální přípustnou hodnotu statické sací výšky. Pro aktuální kótu hladiny dolní vody určí maximální přípustnou kótu oběžného kola turbíny. Při výpočtu v průtokové řadě rovněž určí nejnižší vypočtenou hodnotu kóty OK, jež je rozhodující pro návrh vodní elektrárny. Statická sací výška je zobrazena nad rovinou Q-H, do grafu jsou zobrazeny jednotlivé provozní stavy a je vyznačen kritický bod (určující požadovanou kótu OK). Určení tohoto bodu poskytuje cennou informaci pro technickoekonomické zhodnocení plánovaného VD. Pro kavítaci je obvykle rozhodující poměrně úzký rozsah provozních stavů. Dle uvážení investora lze provoz turbíny v této oblasti vyloučit. Za cenu snížení výroby elektrické energie tak lze snížit investiční náklady na stavební část VD.



Obr. 5.18 – Zobrazení kavitačních poměrů na turbíně

6. OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI MODELU

Funkčnost matematického modelu byla ověřena na reálných datech, popsaných v podkapitole 6.1. Na řešení v reálné průtokové řadě i v čáře překročení m-denních průtoků jsou demonstrovány možné použití vytvořeného programu.

6.1. Vstupní data

Následující vstupní data jsou společná všem provedeným simulacím. Ostatní vstupní data, která se pro jednotlivé simulace různí, jsou v daném oddílu textu explicitně uvedena.

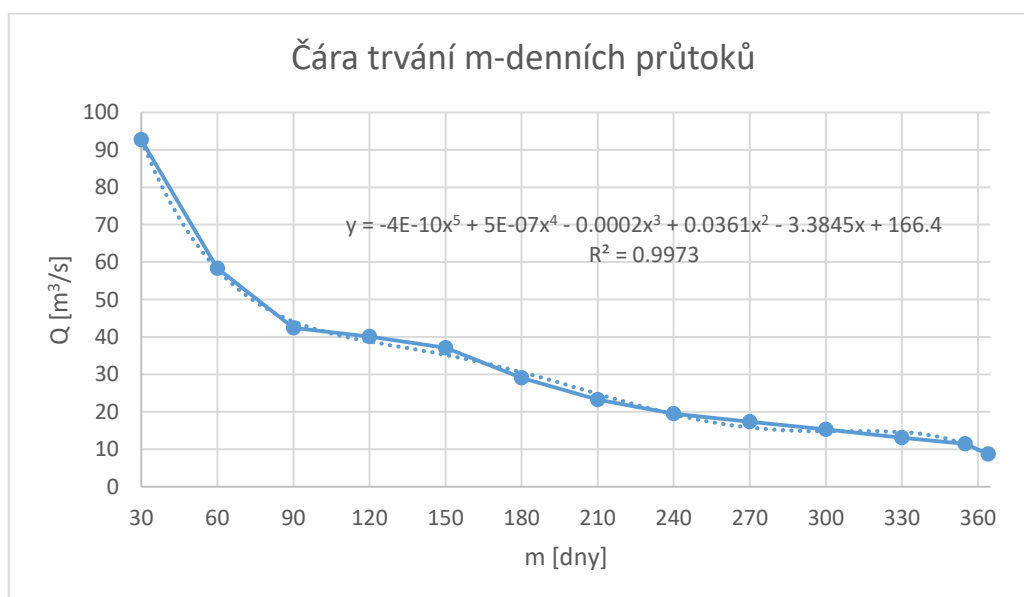
6.1.1. Čára trvání m-denních průtoků

Při řešení byla použita čára trvání m-denních průtoků (vyhodnocená z let 1994 – 2005) pro profil jezu Terežín na Ohři poskytnutá státním podnikem Povodí Ohře. Hodnoty průtoků v toku jsou ovlivněny VD Nechanice, zejména nadlepšováním minimálních zůstatkových průtoků na hodnotu 8 m³/s.

Tab. 6.1 – Průměrné denní průtoky v profilu Terežín

m [dny]	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	355	364
Q [m ³ /s]	92.7	58.3	42.4	40.1	37.1	29.1	23.3	19.5	17.4	15.3	13.1	11.5	8.7

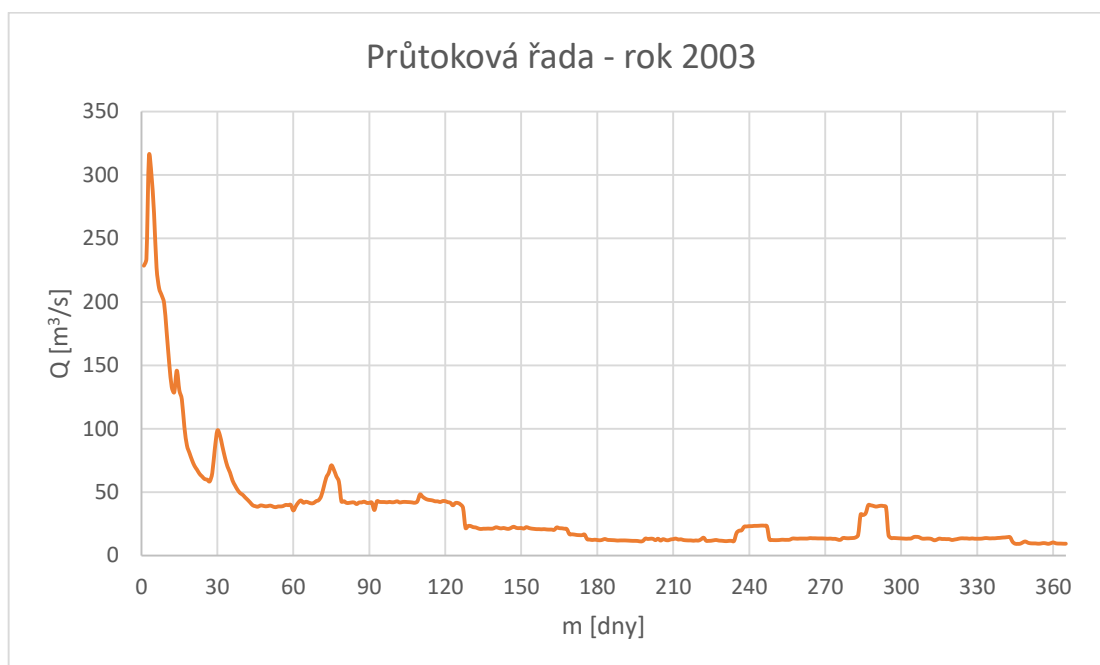
Pro interpolaci a extrapolaci zbylých průtoků byla užita polynomická funkce 5. řádu.



Obr. 6.1 – Čára m-denních průtoků v profilu Terežín

6.1.2. Průtoková řada z roku 2003

Pro řešení v časové řadě byla využita reálná průtoková řada v profilu jezu Terežín z roku 2003. Průtoky byly ponechány v chronologickém pořadí, na časové řadě tedy byla provedena simulace reálného provozu VE.



Obr. 6.2 – Reálná průtoková řada z roku 2003 v profilu Terežín

6.1.3. Kóta hladiny v toku

Pro určení hladiny dolní vody byla užita konzumpční křivka v profilu Terežín, poskytnutá státním podnikem Povodí Ohře. Hladina horní vody je uvažována na konstantní úrovni **147.8 m n. m.**, odpovídající reálné situaci na jezu. Z těchto údajů lze rovněž určit závislost hrubého spádu na průtoku v toku, jak patrně z následující tabulky:

Tab. 6.2 – Konzumpční křivka dolní vody v profilu Terežín

Q [m³/s]	Hl. dolní vody [m n. m.]	H _{brutto} [m]	Q [m³/s]	Hl. dolní vody [m n. m.]	H _{brutto} [m]
0	144.40	3.40	100	145.70	2.10
10	144.74	3.06	150	146.14	1.66
20	144.90	2.90	200	146.58	1.22
30	145.04	2.76	240	146.92	0.88
40	145.16	2.64	270	147.18	0.62
50	145.25	2.55	300	147.39	0.41
75	145.47	2.33			

6.1.4. Hydraulické ztráty

Pro určení hydraulických ztrát byl užit zjednodušující předpoklad kvadratické závislosti na průtoku dle vzorce:

$$H_{ztr} = K_p \cdot Q^2 \quad (6.1)$$

kde H_{ztr} ... je ztrátová výška, Q ... je průtok VE/turbínou a K_p ... ztrátový koeficient.

Hydraulické ztráty jsou určeny tak, aby odpovídaly maximálně 8 % návrhového spádu při návrhovém průtoku. Na tyto hodnoty se poté předpokládá projektování hydraulického obvodu VE.

Koeficient K_p pro společné ztráty (pro průtok VE) byl zvolen v hodnotě **1.1e-04**, přičemž 60 % bylo přisouzeno ztrátám na přívodu a 40 % ztrátám na odpadu. Koeficient K_p pro ztráty na turbíně (pro průtok turbínou) by měl být volen dle počtu instalovaných strojů (pro více instalovaných strojů na téže lokalitě se předpokládá jejich menší rozměr a tedy větší hydraulické ztráty). Pro dvě instalované soustrojí je v této práci volena hodnota **1.3e-04**.

6.1.5. Universální charakteristika

Universální charakteristika byla použita z vertikální Kaplanovi turbíny instalované na vodním díle Gabčíkovo (viz *obr. 9.1* a *obr. 9.2* v přílohách). Získaná data byla ve formátu textového souboru, v nichž první sloupec představoval jednotkové otáčky, druhý jednotkový průtok a třetí závislou veličinu v bodě určeném prvním a druhým sloupcem (výkon, otevření rozvaděče atd.).

Body universální charakteristiky, odpovídající jednotlivým měřením na modelové turbíně, byly nepravidelně rozloženy. Pro potřeby modelu bylo nutné získaná data upravit do pravidelné obdélníkové sítě. Zvolena byla síť o rozměrech 200 x 200 bodů. Pro interpolaci hodnot závislé proměnné v jednotlivých bodech sítě z původního souboru dat byly po vizuálním posouzení vhodnosti zvoleny různé interpolační metody, jak je patrné z *tab. 6.3*.

Tab. 6.3 – Zvolené interpolační metody

Proměnná	Metoda interpolace
Účinnost η	Biharmonická spline
Otevření rozváděcího kola α	Kubická
Otevření oběžného kola β	Kubická
Kavitační součinitel σ	Kubická

6.1.6. Omezující podmínky

V simulacích je minimální zůstatkový průtok rybím přechodem uvažován hodnotou **2.5 m³/s** a maximální průtok vodní elektrárnou v hodnotě **35 m³/s**.

6.1.7. Účinnosti

Na vodní elektrárně se předpokládá použití řemenové převodovky s účinností **97 %**. Účinnost instalovaného generátoru se uvažuje v hodnotě **91 %** a účinnost transformátoru **95 %**.

Takto zvolené účinnosti jsou zhruba ve středu běžně se vyskytujících hodnot. Navýšení účinnosti jednotlivých komponent vodní elektrárny zvedne celkovou výrobu energie, navýší se ovšem rovněž investiční náklady na pořízení dokonalejších strojů. Volba konkrétního provedení převodovky, generátoru a transformátoru je jeden z problémů technickoekonomického rozboru, pro nějž tento matematický model generuje informace.

6.2. Řešení v čáře překročení m-denních průtoků

Při řešení v průtokové řadě lze modelu využít k provedení citlivostní analýzy libovolného výstupu na libovolném parametru či kombinaci parametrů vodní elektrárny. Jako hlavní sledovaný výstup byla zvolena roční výroba elektrické energie, jelikož představuje účel, za nímž je VE budována, a rovněž zisk plynoucí investorovi. Při citlivostní analýze je třeba většině proměnných přisoudit konstantní hodnotu a pouze jednu, či omezenou kombinaci parametrů měnit. Vliv těchto proměnných na roční výrobě energie je poté zkoumán.

6.2.1. Citlivostní analýza výroby energie na provozních otáčkách

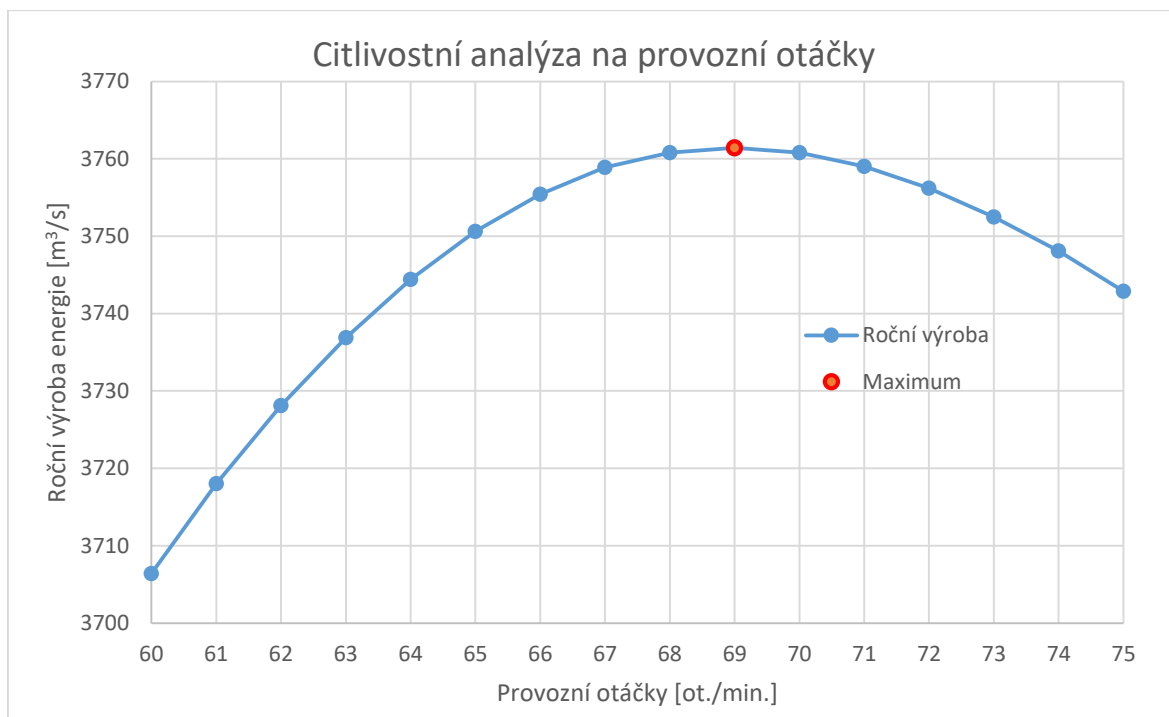
Tab. 6.4 – Konstantní parametry pro citlivostní analýzu 1

Instalované soustrojí	2	[-]	Hladina horní vody	147.8	[m n.m.]
Průměr oběžného kola	3.1	[m]	Max. průtok VE	35	[m ³ /s]
Min. spád turbíny	1	[m]	MZP	2.5	[m ³ /s]
Min. průtok turbínou	2	[m ³ /s]	Účinnost převodovky	0.97	[-]
Koeficient K _p (pro turbínu)	1.3e-4	[-]	Účinnost generátoru	0.91	[-]
Celkové ztráty při H _{návrhový}	0.214	[m]	Účinnost transformátoru	0.95	[-]
H _{ztrátová} /H _{návrhový}	8	[%]			

První citlivostní analýza (dále označována analýza 1) byla zpracována pro 2 instalované soustrojí o průměru 3.1 m. Byl sledován vliv provozních otáček na roční výrobu energie, informativně byly zaznamenávány rovněž body přepínání a max. přípustná kóta turbíny. Hodnoty pro analýzu neměnných parametrů lze vyčíst z tab. 6.4 (a v podkapitole 6.1), výsledky jsou zobrazeny v tab. 6.5 a na obr. 6.3.

Tab. 6.5 – Výsledky citlivostní analýzy 1

Provozní otáčky	Roční výroba	Bod přepínání	Max. kóta turbíny
[ot./min.]	[MWh]	[m³/s]	[m n. m.]
60	3706.4	14.9	152.89
61	3718	15.2	152.88
62	3728.1	15.4	152.88
63	3736.9	15.7	152.86
64	3744.4	16.1	152.86
65	3750.6	16.4	152.85
66	3755.4	16.8	152.83
67	3758.9	17.1	152.82
68	3760.8	17.4	152.81
69	3761.4	17.7	152.8
70	3760.8	18.1	152.78
71	3759	18.3	152.78
72	3756.2	18.6	152.76
73	3752.5	18.9	152.74
74	3748.1	19.2	152.73
75	3742.9	19.4	152.71

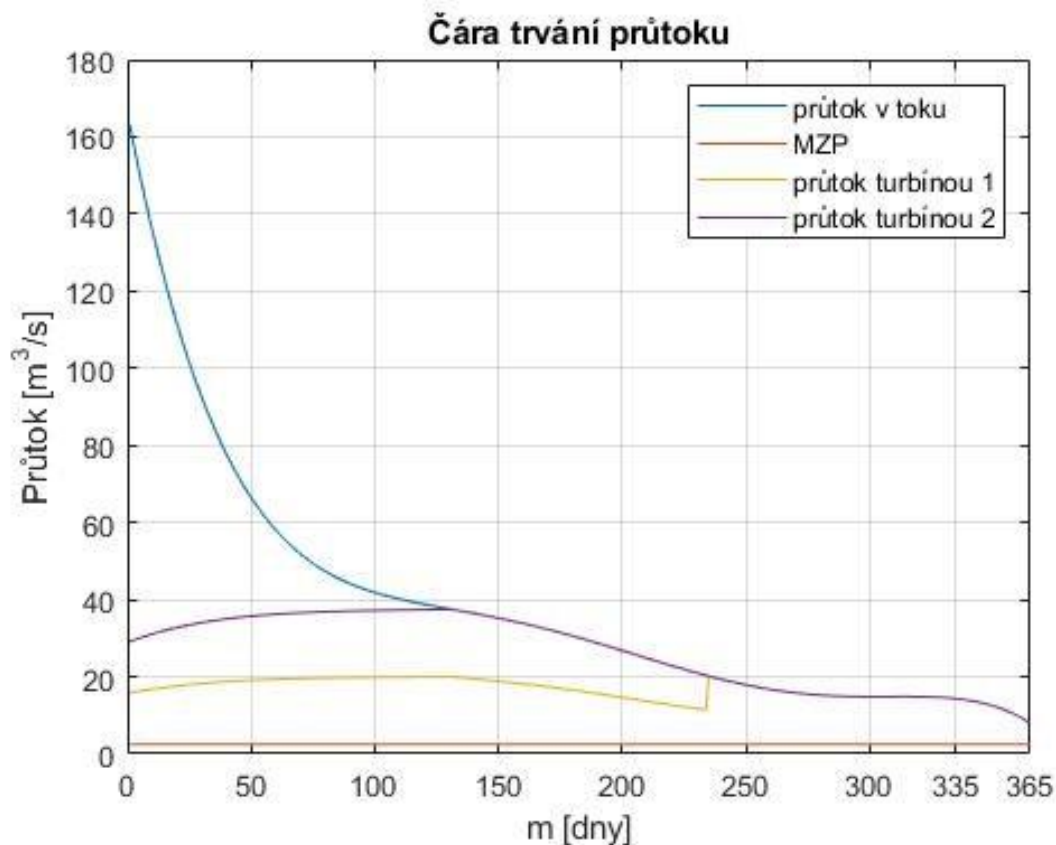


Obr. 6.3 – Výsledky citlivostní analýzy 1

Při výše uvedeném nastavení parametrů je maxima roční výroby energie dosaženo při provozních otáčkách $n = 69 \text{ ot./min.}$ Simulace v tomto bodě je v následujícím textu blíže rozebrána. Výsledné hodnoty v bodě maxima jsou uvedeny v tab. 6.6.

Tab. 6.6 – Citlivostní analýza 1 – bod maxima

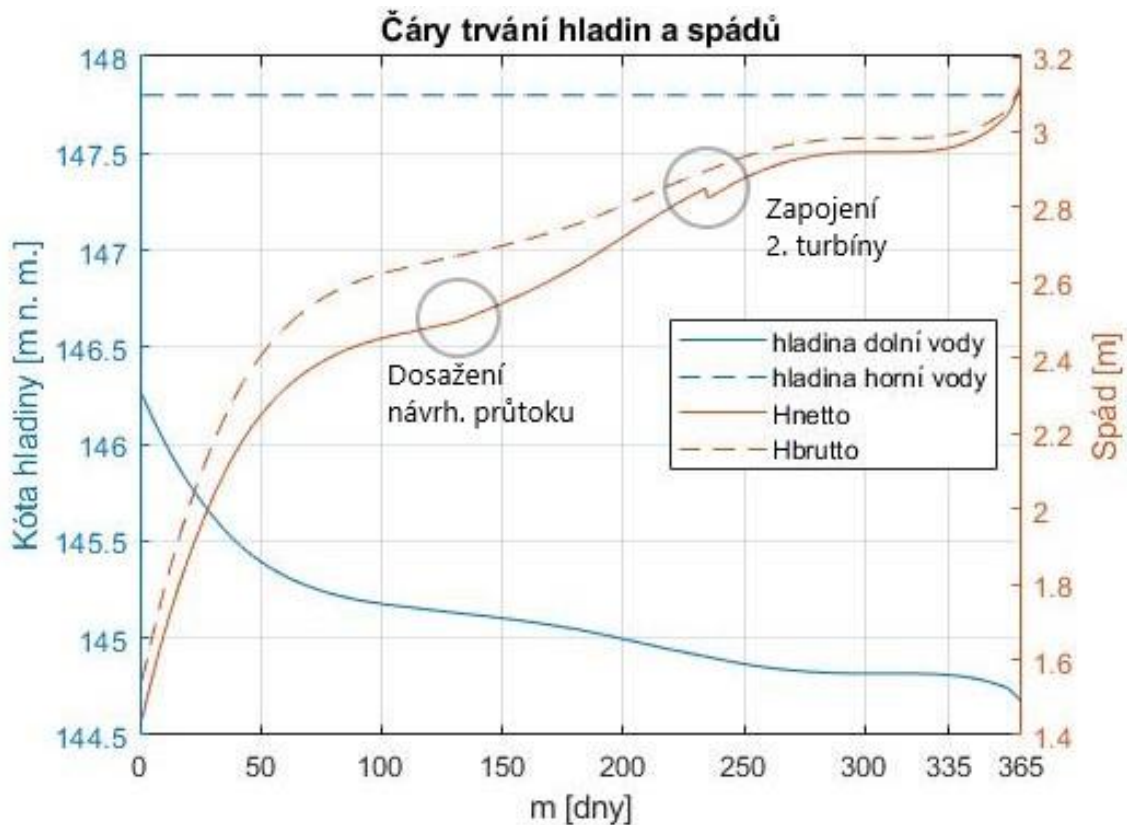
Maximum	
Provozní otáčky [ot./min.]	69
Roční výroba energie [MWh]	3761.4
Bod přepínání [m^3/s]	17.7
Max. kóta turbíny [m n. m.]	152.8
Max. výkon na turbíně [kW]	425.2
Max. výkon elektrárny [kW]	625.5



Obr. 6.4 – Analýza 1 – Čára trvání průtoků

V čáře trvání průtoků jsou dobře viditelné průtokové poměry na VD během simulace. Z toku je po celou dobu roku odebírán MZP, jelikož má vyšší prioritu, než vodní elektrárna. Zbytek průtoku je k dispozici pro hydroenergetické využití. V oblasti vysokých m-denností pracuje pouze jedna turbína, díky nadlepšování průtoků z vodního díla Nechranice je v provozu celoročně. Pokud by k nadlepšování nedocházelo, v oblastech nejnižších průtoků by VE pravděpodobně nepracovala, jelikož by nebyla splněna podmínka min. zpracovatelného průtoku turbínou (zde $2 \text{ m}^3/\text{s}$).

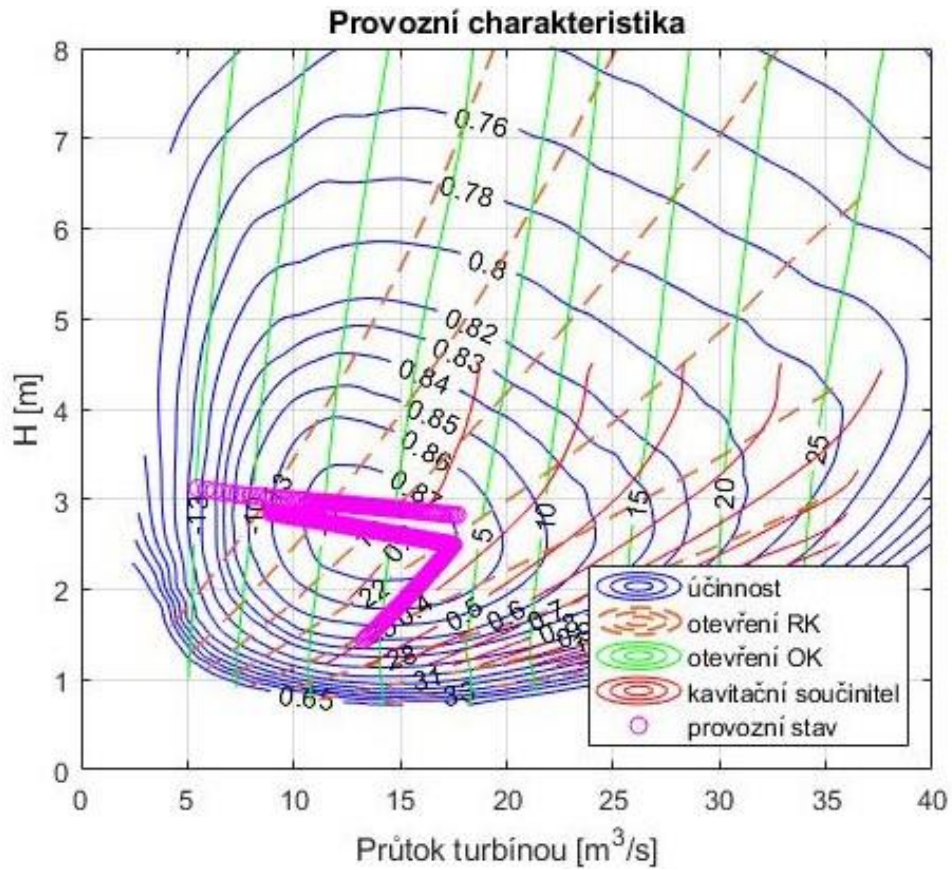
V momentě, kdy průtok ve vodním toku přesáhne první přepínací bod (zde $17.7 + 2.5 \text{ (MZP)} = 20.2 \text{ m}^3/\text{s}$), zapojuje se do provozu i druhá turbína a průtok se mezi ně rovnoměrně dělí. Po dosažení návrhového průtoku začíná průtok turbínou klesat dle podmínky (5.1) z důvodu poklesu spádu.



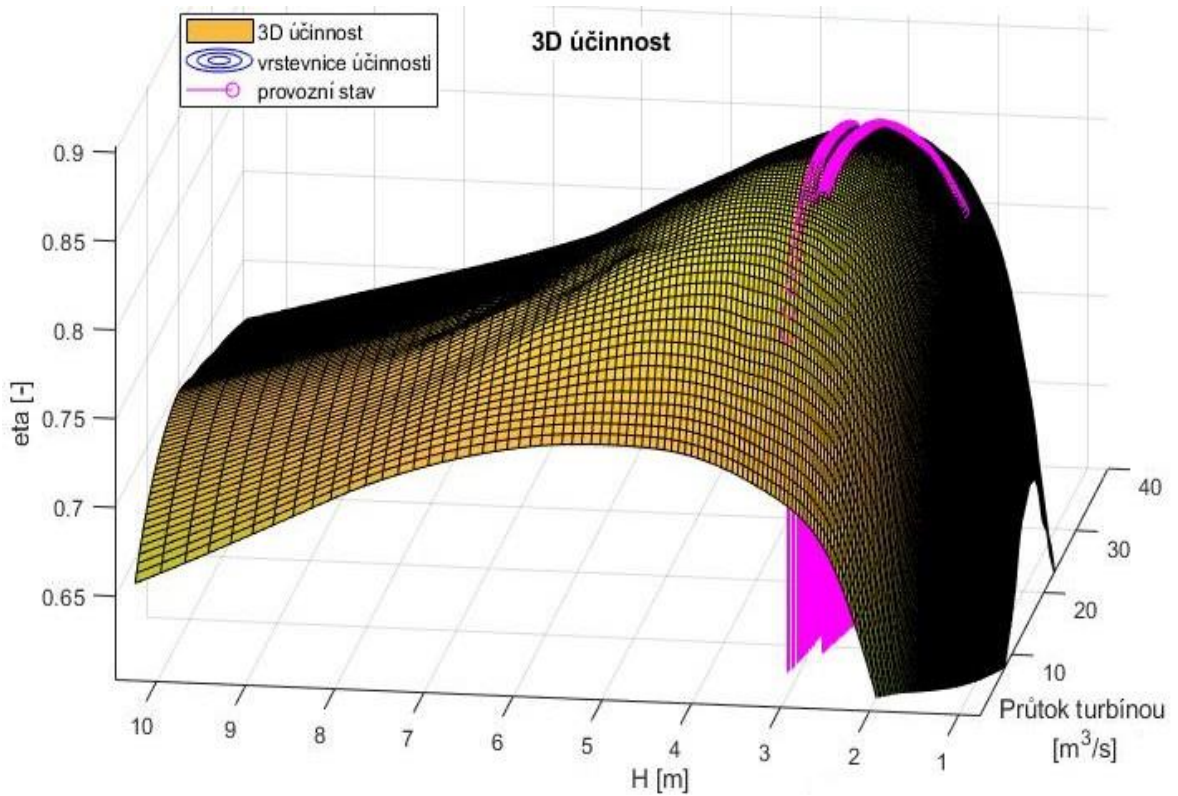
Obr. 6.5 – Analýza 1 – Čára trvání hladin a spádů

Spádové poměry během simulace lze vyčíst z obr. 6.5. Je zde patrný moment zapojení druhé turbíny (vyznačen do obrázku), dochází při něm ke skokovému zvýšení čistého spádu. Důvodem je podmínění části hydraulických ztrát průtokem turbínou. Ten se v momentě zapojení druhé turbíny skokově zmenší, dochází tedy rovněž ke zmenšení hydraulických ztrát a nárůstu čistého spádu. Také je postřehnutelné dosažení návrhového průtoku VE, nastává při něm k lomu v čáře čistého spádu. Průtok VE se za tímto bodem již nezvyšuje, čára trvání H_{netto} se tedy již nevzdaluje od čáry H_{brutto} dalším narůstáním ztrát. Naopak se jí začíná nepatrně přibližovat, neboť se průtok VE v důsledku snižování spádu zmenšuje.

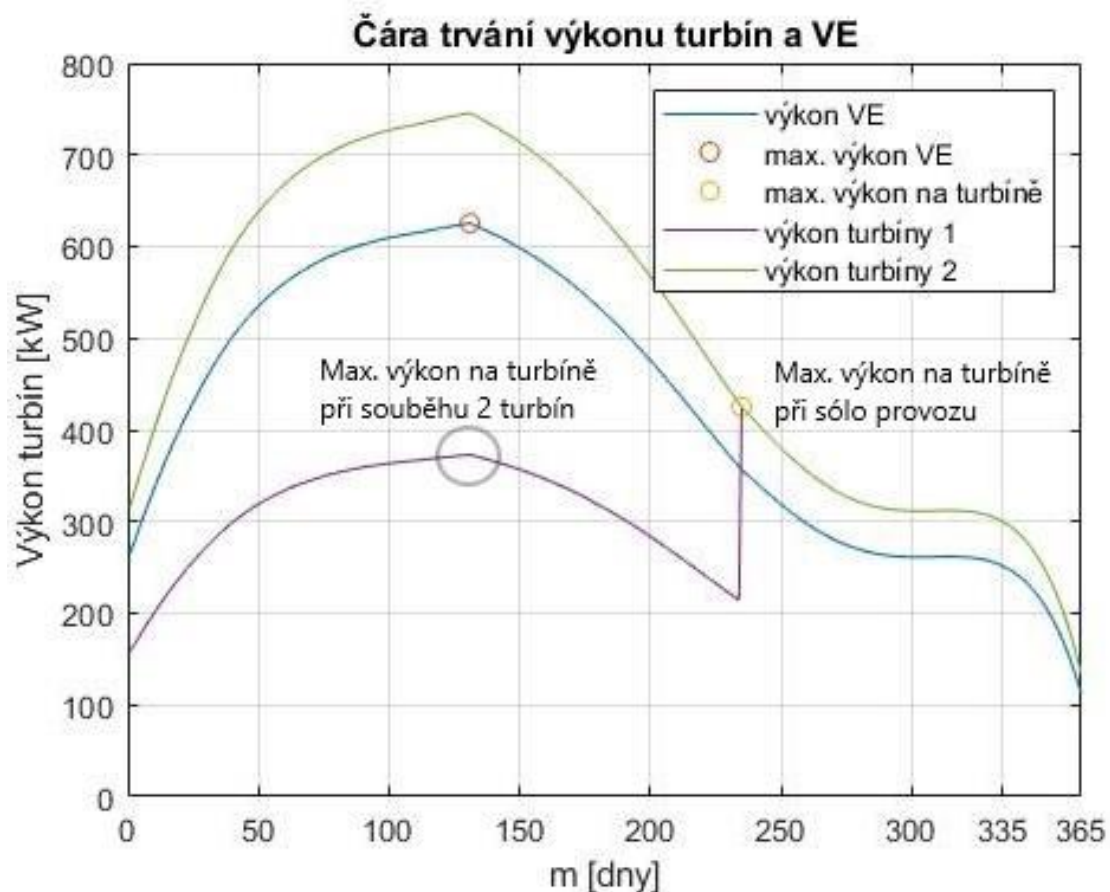
Z provozní charakteristiky (obr. 6.6) je zřejmé, jakých provozních stavů turbíny během simulace dosahovaly. Je patrné, že provozní otáčky jsou vzhledem k průměru oběžného kola turbíny vhodně zvoleny, neboť se provozní stavy turbíny pohybují převážně v oblasti nejvyšších účinností. To lze vyčíst i z prostorového vykreslení účinnosti (obr. 6.7).



Obr. 6.6 – Analýza 1 – Provozní charakteristika



Obr. 6.7 – Analýza 1 – Prostorové vykreslení účinnosti



Obr. 6.8 – Analýza 1 – Čáry trvání výkonů

Průběhy výkonů na hřídelích turbín a výkonu VE dodávaného do sítě přibližuje obr. 6.8. Zelená a fialová křivka zobrazují dělení výkonu mezi jednotlivé turbíny (viz obr. 3.3). Modrá křivka představuje výkon VE dodávaný do sítě. Ten je nižší, než součtový výkon na turbínách, o ztráty na převodovce, na generátoru a transformátoru.

Na obr. 6.8 je patrný bod dosažení návrhového průtoku VE, za nímž dochází k snižování výkonů v důsledku poklesu spádu i průtoku vodní elektrárnou. Dále je do grafu vyznačen bod maximálního dosaženého výkonu na turbíně a VE. Za povšimnutí stojí skutečnost, že maximální dosažený výkon na turbíně při souběžném provozu je nižší, než při sólo provozu. Kvůli tomuto efektu dochází k předimenzování souvisejících technologických zařízení (generátor, vypínače atd.), které musí být dimenzovány na nejvyšší dosažený výkon. Omezením sólo provozu turbíny v oblasti nejvyšších výkonů lze za cenu snížení výroby energie snížit investiční náklady.

6.2.2. Citlivostní analýza výroby na otáčkách a průměru OK

Tab. 6.7 – Konstantní parametry pro citlivostní analýzu 2

Instalované soustrojí	2	[-]	Hladina horní vody	147.8	[m n.m.]
Min. spád turbíny	1	[m]	Max. průtok VE	35	[m ³ /s]
Min. průtok turbínou	2	[m ³ /s]	MZP	2.5	[m ³ /s]
Koeficient K _p (pro turbínu)	1.3e-4	[-]	Účinnost převodovky	0.97	[-]
Celkové ztráty při H _{návrhový}	0.214	[m]	Účinnost generátoru	0.91	[-]
H _{ztrátová} /H _{návrhový}	8	[%]	Účinnost transformátoru	0.95	[-]

Jako druhá (dále analýza 2) byla zpracována citlivostní analýza výroby elektrické energie na provozních otáčkách a průměru oběžného kola turbíny, jež je zobecněním analýzy 1 (viz podkapitolu 6.2.1). V tomto případě není sledován vliv jednoho, ale kombinace dvou parametrů. Výsledkem tedy není vektor, nýbrž matice, v níž každý prvek odpovídá roční výrobě energie pro konkrétní kombinaci provozních otáček a průměru OK. Zbylé parametry byly ponechány ve stejných hodnotách, jako při analýze 1.

Pro nalezení maxima byla zvolena poměrně hustá síť testovaných bodů – provozní otáčky v rozsahu 60-75 ot./min. s krokem 1 ot./min. a průměry OK v rozsahu 3-3.4 m s krokem 0.02 m. Výsledky byly vypsány do *tab. 6.9* a pro lepší názornost byly barevně podkresleny.

Maximální výroba byla zjištěna pro průměr OK 3.26 m a provozní otáčky 64 ot./min. Jde tedy o odlišný bod, než byl nalezen v analýze 1. Je třeba si uvědomit, že analýza 1 poskytuje pouze výsekovou informaci, jelikož průměr oběžného kola v hodnotě 3.1 m byl určen odhadem. Analýza 2 tedy podává mnohem komplexnější informaci. Dále je nutné mít na zřeteli, že bod maxima výroby nemusí být nutně optimem, jelikož problém návrhu VE je velmi komplexní a v úvahu je nutné vzít celou škálu okolností.

Tab. 6.8 – Citlivostní analýza 2 – bod maxima

Maximum	
Provozní otáčky [ot./min.]	64
Průměr oběžného kola [m]	3.26
Roční výroba energie [MWh]	3765.3
Bod přepínání [m ³ /s]	18.8
Max. kóta turbíny [m n. m.]	152.82
Max. výkon na turbíně [kW]	446.4
Max. výkon elektrárny [kW]	628.2

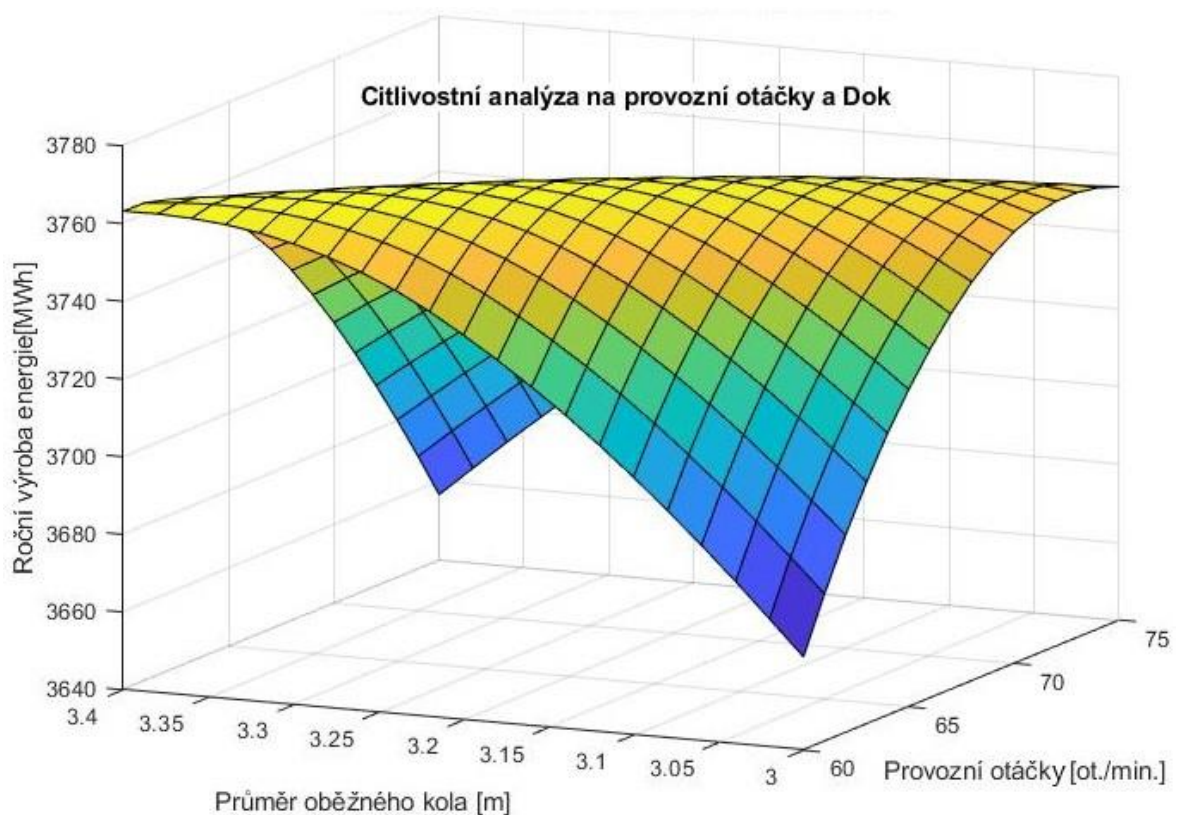
Tab. 6.9 – Výsledky citlivostní analýzy 2

Dok [m]	n[ot./min.]	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75
	3	3664	3678	3690.9	3702.4	3712.7	3721.7	3729.7	3736.7	3742.7	3747.5	3751.1	3753.4	3754.5	3754.5	3753.5	3751.5
	3.02	3673	3686.7	3699.1	3710.1	3719.8	3728.4	3735.8	3742.3	3747.6	3751.7	3754.5	3756	3756.3	3755.5	3753.7	3751
	3.04	3681.9	3695.1	3706.9	3717.4	3726.6	3734.6	3741.5	3747.4	3751.9	3755.2	3757.2	3757.8	3757.3	3755.8	3753.2	3749.8
	3.06	3690.4	3703.1	3714.4	3724.3	3733	3740.4	3746.8	3751.9	3755.7	3758.1	3759.1	3759	3757.6	3755.3	3752.1	3748.1
	3.08	3698.6	3710.7	3721.5	3730.8	3738.9	3745.8	3751.4	3755.7	3758.6	3760.1	3760.3	3759.3	3757.2	3754.2	3750.4	3745.7
	3.1	3706.4	3718	3728.1	3736.9	3744.4	3750.6	3755.4	3758.9	3760.8	3761.4	3760.8	3759	3756.2	3752.5	3748.1	3742.9
	3.12	3713.8	3724.8	3734.3	3742.5	3749.4	3754.8	3758.7	3761.2	3762.3	3762	3760.6	3758.1	3754.6	3750.4	3745.4	3739.6
	3.14	3720.8	3731.1	3740.1	3747.6	3753.6	3758.2	3761.2	3762.8	3763	3761.9	3759.8	3756.6	3752.6	3747.7	3742.2	3735.9
	3.16	3727.3	3737	3745.4	3752.1	3757.3	3760.9	3763	3763.7	3763.1	3761.3	3758.4	3754.7	3750	3744.7	3738.6	3731.8
	3.18	3733.4	3742.5	3750.1	3755.9	3760.2	3762.9	3764.1	3764	3762.6	3760.1	3756.6	3752.3	3747	3741.2	3734.6	3727.3
	3.2	3739.1	3747.5	3754.2	3759.1	3762.5	3764.2	3764.6	3763.7	3761.6	3758.5	3754.4	3749.4	3743.7	3737.3	3730.2	3722.4
	3.22	3744.4	3751.9	3757.6	3761.6	3764	3764.9	3764.5	3762.9	3760.1	3756.4	3751.7	3746.2	3740	3733.1	3725.5	3717.2
	3.24	3749	3755.6	3760.3	3763.4	3765	3765.1	3763.9	3761.6	3758.2	3753.9	3748.6	3742.6	3735.9	3728.6	3720.4	3711.6
	3.26	3752.9	3758.5	3762.4	3764.6	3765.3	3764.7	3762.8	3759.9	3755.9	3751	3745.2	3738.8	3731.6	3723.6	3715	3705.7
	3.28	3756.1	3760.8	3763.8	3765.2	3765.1	3763.8	3761.3	3757.7	3753.2	3747.8	3741.5	3734.5	3726.8	3718.4	3709.2	3699.5
	3.3	3758.7	3762.5	3764.6	3765.2	3764.5	3762.5	3759.4	3755.3	3750.2	3744.2	3737.5	3730	3721.7	3712.7	3703.1	3692.9
	3.32	3760.7	3763.6	3764.9	3764.8	3763.3	3760.8	3757.1	3752.4	3746.8	3740.4	3733.1	3725	3716.3	3706.8	3696.7	3686.1
	3.34	3762.1	3764.2	3764.7	3763.9	3761.8	3758.7	3754.5	3749.2	3743.1	3736.2	3728.4	3719.8	3710.5	3700.6	3690.1	3679
	3.36	3762.9	3764.3	3764.1	3762.6	3760	3756.3	3751.5	3745.7	3739.1	3731.6	3723.3	3714.2	3704.4	3694.1	3683.2	3671.8
	3.38	3763.3	3763.9	3763.1	3761	3757.8	3753.5	3748.2	3741.9	3734.8	3726.7	3717.9	3708.3	3698.1	3687.3	3676.1	3664.3
	3.4	3763.2	3763.1	3761.6	3759	3755.2	3750.4	3744.5	3737.8	3730.1	3721.5	3712.2	3702.1	3691.5	3680.4	3668.8	3656.7

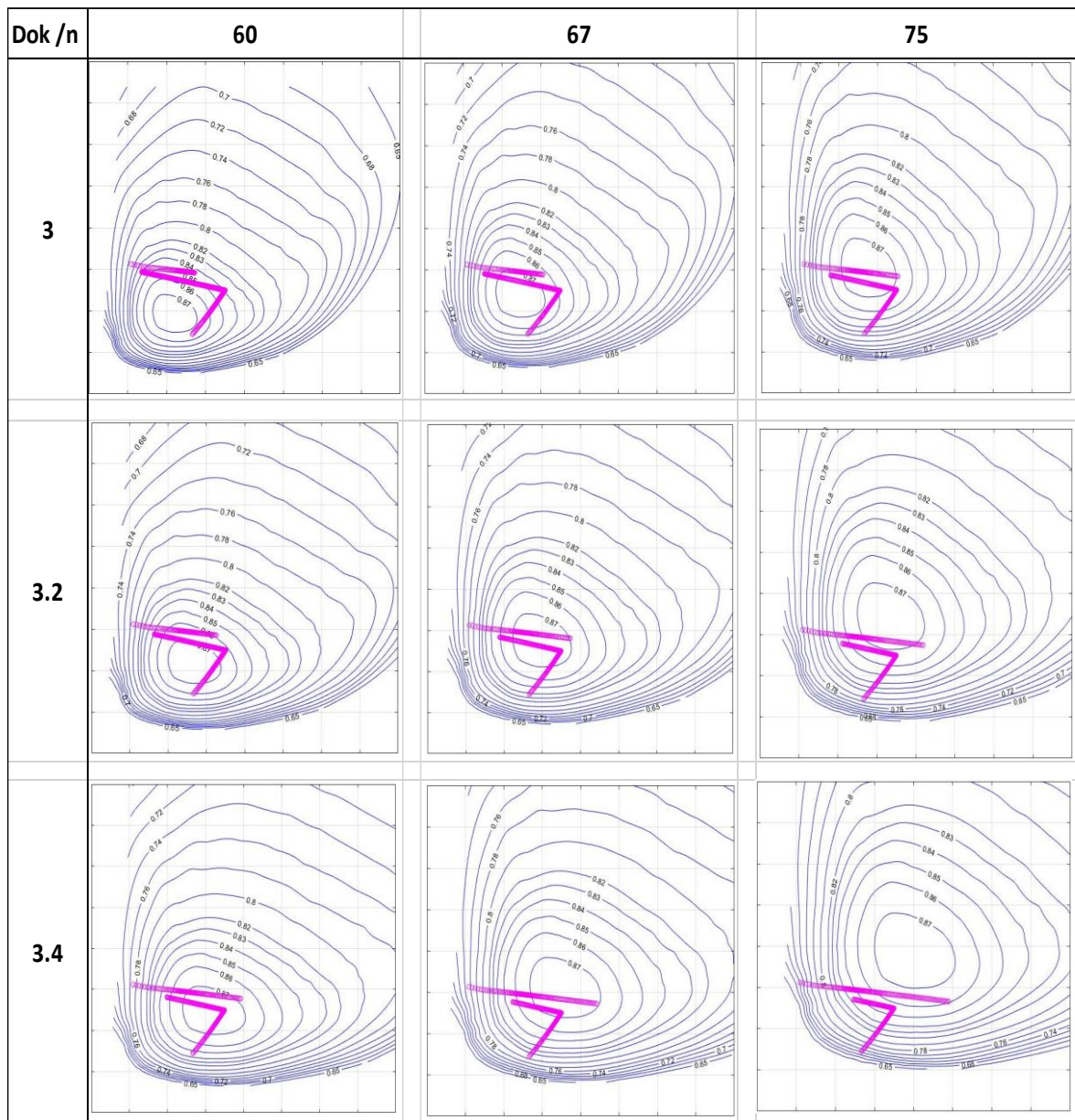
Matici ročních výrob energie z *tab. 6.9* lze vykreslit jako prostorovou funkci nad rovinou $n - D_{OK}$ (*obr. 6.9*). Na této vizualizaci lze dobře vidět tendenci, postřehnutelnou i v *tab. 6.9*. Roční výroba energie se pro danou simulaci pohybuje v poměrně širokém pásmu kombinací $n - D_{OK}$ s minimálním poklesem své velikosti. Jde o cenné zjištění, vezme-li se v potaz povaha zkoumaných proměnných. Instalování větší turbíny výrazně zvedne investiční náklady elektrárny. Naproti tomu volba provozních otáček má na výslednou cenu investice zanedbatelný vliv. Díky užití převodovky lze zvolit prakticky libovolnou hodnotu n a zvolenému průměru OK otáčky přizpůsobit. Je tedy jistě vhodné při návrhu cílit na menší a levnější turbínu.

Alternativně lze uvažovat i umístění synchronního generátoru na společné hřídeli s turbínou (tedy vypuštění převodovky) a zvolit synchronní provozní otáčky v hodnotě 60 či 75 ot./min. I v tomto případě lze dosáhnout zajímavých hodnot roční výroby energie.

V krajních, nebo jinak významných bodech *tab. 6.9* byly provozní charakteristiky příslušných simulací zakresleny do *obr. 6.10*. V něm lze dobře pozorovat vliv kombinace parametrů $n - D_{OK}$ na provozní stavy turbíny vůči účinnosti, a tedy i roční výrobě energie.



Obr. 6.9 – Analýza 2 – Prostorové vykreslení výsledků



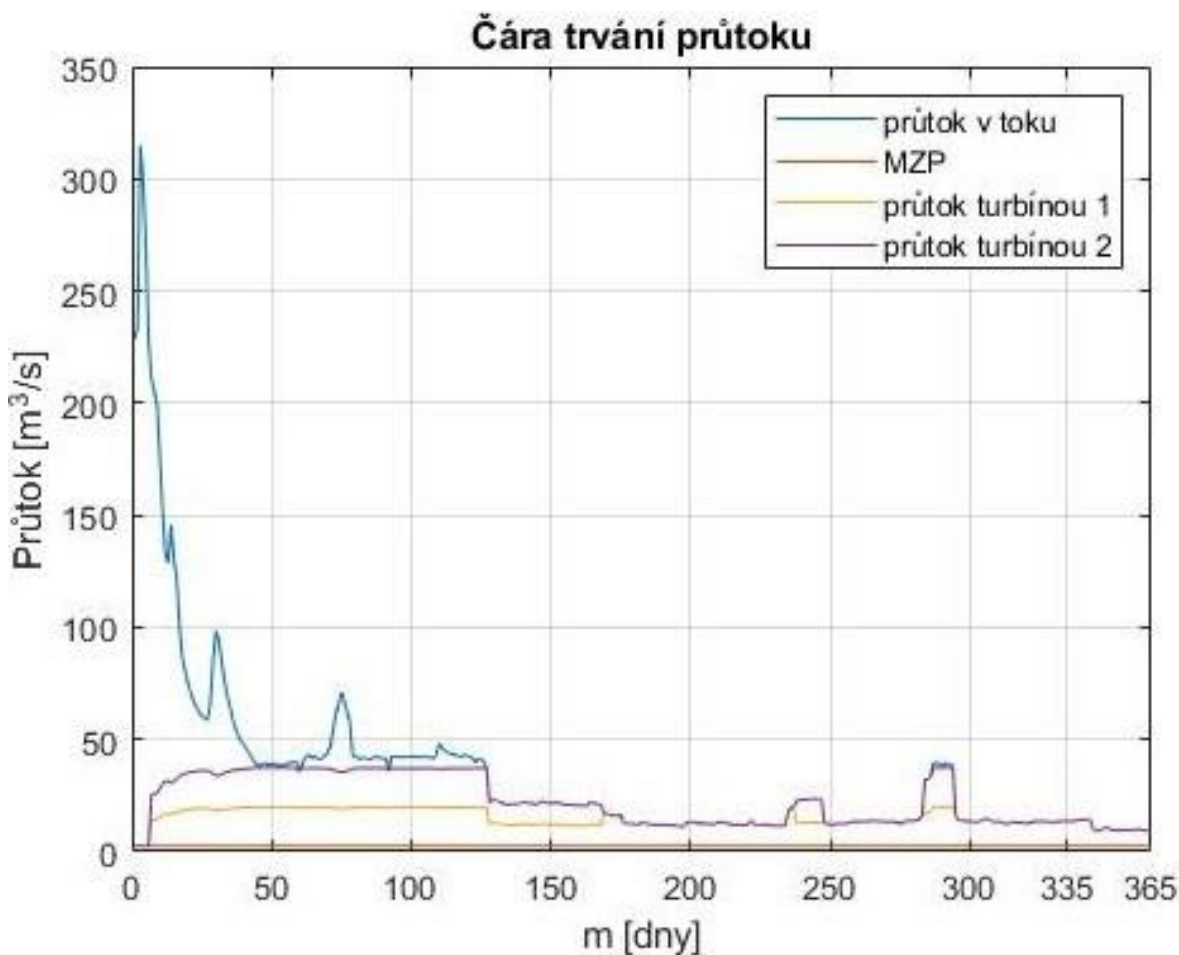
Obr. 6.10 – Analýza 2 – Provozní charakteristiky simulací

6.3. Řešení v reálné průtokové řadě

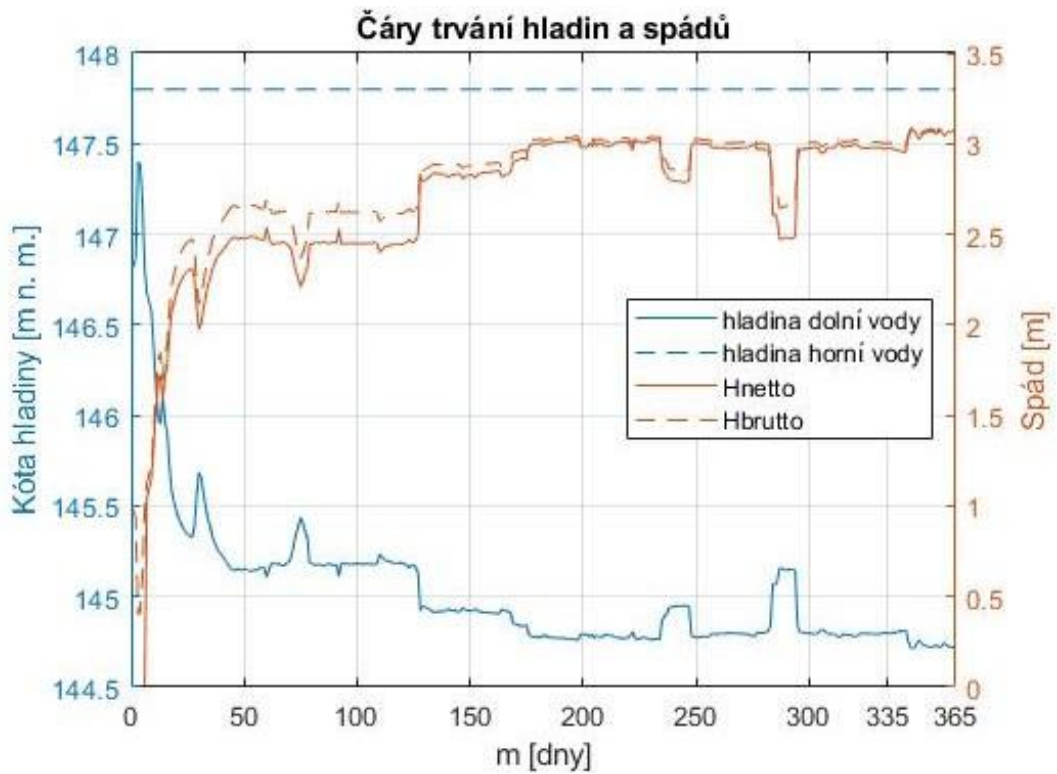
Tab. 6.10 – Parametry VE pro simulaci v reálné řadě

Instalované soustrojí	2	[-]	Hladina horní vody	147.8	[m n.m.]
Provozní otáčky	69	[m]	Účinnost převodovky	0.97	[-]
Průměr oběžného kola	3.1	[m]	Účinnost generátoru	0.91	[-]
Min. spád turbíny	1	[m]	Účinnost transformátoru	0.95	[-]
Min. průtok turbínou	2	[m ³ /s]	Koeficient Kp (pro turbínu)	1.3e-4	[-]
Max. průtok VE	35	[m ³ /s]	Celkové ztráty při H _{návrhový}	0.214	[m]
MZP	2.5	[m ³ /s]	H _{ztrátová} /H _{návrhový}	8	[%]

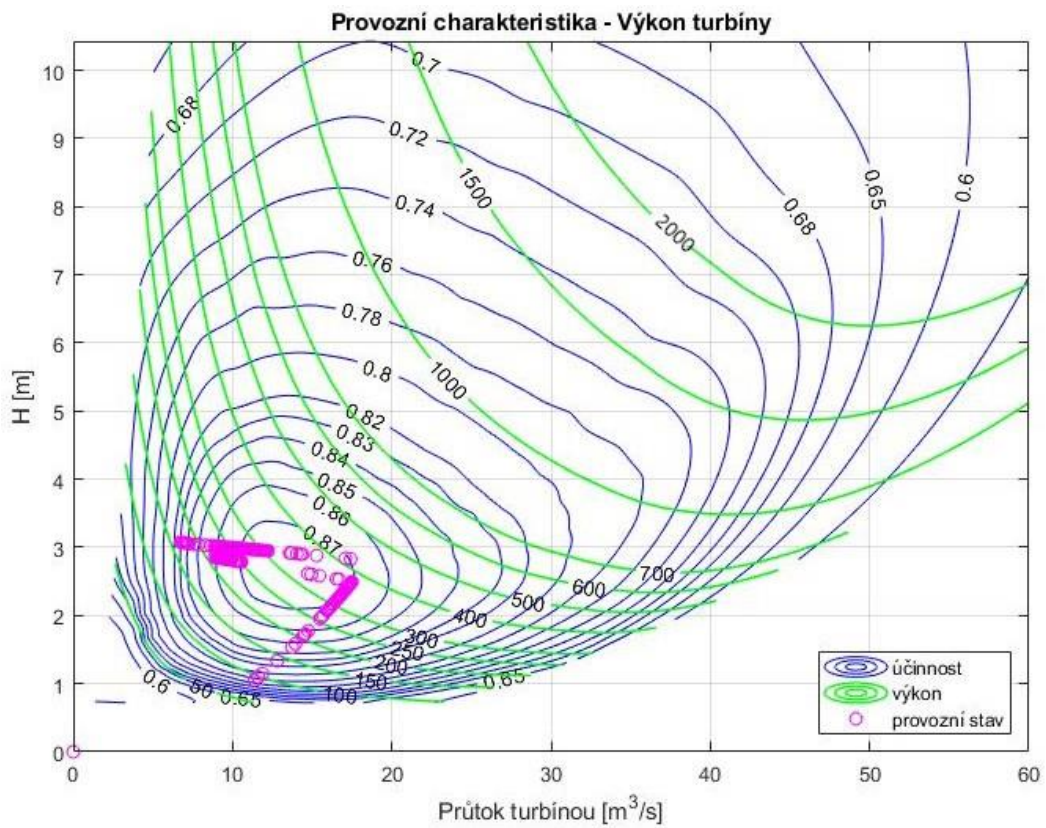
Pro simulaci v reálné průtokové řadě (dále simulace 3) byly ponechány tytéž konstantní parametry VE, jako v analýze 1 a 2, pro provozní otáčky a průměr oběžného kola byl zvolen bod maxima z analýzy 1. Využita byla reálná průtoková řada z profilu jezu Terežín z roku 2003. Jde tedy o simulaci reálného provozu VE, rámcově navržené v analýze 1.



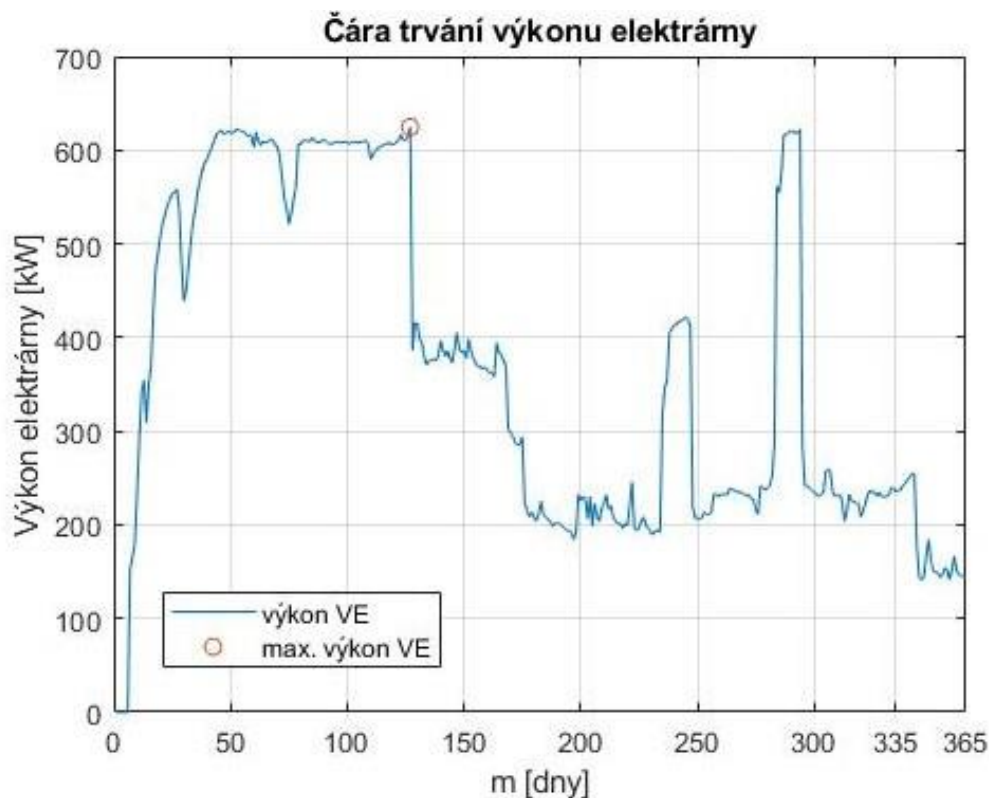
Obr. 6.11 – Simulace 3 – Čára trvání průtoků



Obr. 6.12 – Simulace 3 – Čára trvání hladin a spádů



Obr. 6.13 – Simulace 3 – Provozní charakteristika (účinnost a výkon)



Obr. 6.14 – Simulace 3 – Čára trvání výkonu

Tab. 6.11 – Porovnání simulace v reálné řadě a čáře m-denních průtoků

Reální průtoková řada		Čára překročení m-denních průtoků	
Roční výroba energie [MWh]	3186.3	Roční výroba energie [MWh]	3761.4
Bod přepínání [m^3/s]	17.7	Bod přepínání [m^3/s]	17.7
Max. kóta turbíny [m n. m.]	152.81	Max. kóta turbíny [m n. m.]	152.8
Max. výkon na turbíně [kW]	420.3	Max. výkon na turbíně [kW]	425.2
Max. výkon elektrárny [kW]	624.7	Max. výkon elektrárny [kW]	625.5

Jak je patrné z obr. 6.11 – 6.14, provozní stavy za reálné situace jsou značně rozkolísané. Při této konkrétní simulaci byl dokonce podkročen min. zpracovatelný spád na turbíně a elektrárna několik dní nebyla v provozu. Porovnáním výsledků se simulací v čáře překročení m-denních průtoků (pro bod maxima analýzy 1) bylo zjištěno dosažení znatelně menší roční výroby energie, nepatrně menší byl také max. dosažený výkon na turbíně a VE. Maximální přípustná kóta turbíny vychází v obou simulacích prakticky stejná. Je dobré si uvědomit, že výsledky simulace v čáře překročení m-denních průtoků představují očekávané průměrné hodnoty, výsledky ze simulací v konkrétních letech se tedy mohou značně různit.

7. ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo vytvořit nástroj, usnadňující plánovací proces výstavby malých vodních elektráren. Za tímto účelem byl vytvořen matematický model v programovacím prostředí MATLAB s využitím grafického uživatelského rozhraní, umožňujícího snadné a přehledné ovládání.

Samotnému sestavení modelu předcházela analýza systému nízkotlaké malé vodní elektrárny. Byly vybrány a podrobně popsány prvky a vazby vodní elektrárny, podstatné pro sestavení modelu o cílené komplexitě. Tyto vazby byly vyjádřeny pomocí matematických vzorců a logických podmínek.

Následně byl vytvořen výpočetní program simulující vodní elektrárnu. Při sestavování tohoto programu bylo dbáno na universalitu jeho použití a snadné ovládání. V modelu lze editovat celou řadu vstupních parametrů (vnější hydraulický systém, návrhové parametry turbín, hydraulické ztráty aj.) a sledovat tedy jejich vliv na chování elektrárny. Program pro každé nastavení parametrů navíc automaticky optimalizuje způsob dělení průtoku mezi instalované turbíny.

Simulaci provozu lze provést pro izolovanou hodnotu průtoku či v průtokové řadě. Výpočet pro zvolený průtok poskytuje detailní přehled provozních hodnot, jako jsou aktuální hydraulické ztráty, počet turbín v provozu, otevření rozváděcího a oběžného kola turbíny, výkon vodní elektrárny atd. Simulace v průtokové řadě podává souhrnnější informace o provozu – roční výrobu energie, maximální dosažený výkon elektrárny a na turbíně a požadovanou kótu turbíny pro zajištění bezkavitačního provozu. V obou případech jsou všechny sledované jevy vhodně vizualizovány.

Některé prvky systému vodní elektrárny byly vzhledem ke zvolené úrovni komplexity modelu zjednodušeny, případně zanedbány. Zpřesnění modelu by bylo možno dosáhnout například začleněním dalších limitů. K již zohledněným limitům maximálního průtoku elektrárnou a minimálního zpracovatelného průtoku a spádu by se daly doplnit limity maximálního otevření rozváděcího a oběžného kola a maximálního výkonu turbíny. Rovněž by bylo možné zohlednit vlastní spotřebu technologického zařízení, a to jak konstantní spotřebu celé vodní elektrárny, tak vlastní spotřebu každého soustrojí, projevující se pouze

v době jeho provozu. Další zpřesnění modelu by však již byly nad rámec rozsahu diplomové práce.

Po dokončení byla funkčnost modelu otestována na reálných datech, čímž byly zároveň demonstrovány některé způsoby jeho využití. Simulován byl provoz virtuální vodní elektrárny v profilu jezu Terezín s využitím dvou Kaplanových turbín v čáře překročení m-denních průtoků i reálné průtokové řadě z roku 2003. Na základě četných simulací byla zpracována citlivostní analýza roční výroby energie na provozních otáčkách při fixním průměru oběžného kola i pro kombinaci parametrů průměr oběžného kola - provozní otáčky. Obdobným způsobem lze ovšem provést citlivostní analýzu libovolného výstupu na libovolných vstupech. Model tedy může být využit jako zdroj cenných informací pro technickoekonomické zhodnocení různých uspořádání plánované vodní elektrárny. Simulací v reálné průtokové řadě lze názorněji pozorovat chování elektrárny za skutečného provozu. Výsledky všech provedených simulací odpovídají očekáváním.

Vytvořeného modelu lze využít ve všech fázích plánovacího procesu – pro primární zhodnocení lokality, pro optimalizaci parametrů při prvotním návrhu vodní elektrárny i pro snadné opětovné přepočítání parametrů, narazí-li se při projektové přípravě na nové skutečnosti. V rámci této diplomové práce byl tedy vyvinut funkční matematický model s celou řadou využití při řešení reálných problémů z oblasti hydroenergetiky.

8. SEZNAMY

8.1. Použitá literatura

- [1] BEDNÁŘ, Josef. *Turbíny: [malé vodní elektrárny]*. Českovice: Marcela Bednářová, 2013. ISBN 978-80-905437-0-6.
- [2] BROŽA, Vojtěch, Pavel GABRIEL, František ČIHÁK, Jitka KUČEROVÁ a Antonín PROCHÁZKA. *Využití vodní energie*. Dotisk. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1993. ISBN 80-01-00392-2.
- [3] FÁBRY, Jan. *Matematické modelování*. Praha: Professional Pub., 2011. ISBN 978-80-7431-066-9.
- [4] GABRIEL, Pavel, Teodor GRANDTNER, Miroslav PRŮCHA a Pavel VÝBORA. *Jazy*. Státní nakladatelství technické literatury, 1989.
- [5] GABRIEL, Pavel a Jitka KUČEROVÁ. *Navrhování vodních elektráren*. Praha: České vysoké učení technické, 1995. ISBN 80-01-01304-9.
- [6] GABRIEL, Pavel, František ČIHÁK a Petr KALANDRA. *Malé vodní elektrárny*. Praha: České vysoké učení technické, 1998. ISBN 80-01-01812-1.
- [7] KEMEL, Miroslav. *Klimatologie, meteorologie, hydrologie*. Praha: České vysoké učení technické, 1996. ISBN 80-01-01456-8.
- [8] MELICHAR, Jan. *Malé vodní turbíny*. Vyd. 2. přeprac. Praha: ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02164-5.
- [9] MELICHAR, Jan. *Hydraulické a pneumatické stroje, část vodní turbíny*. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2013. ISBN 978-80-01-05283-9.
- [10] MELICHAR, Jan, Jan VOJTEK a Jaroslav BLÁHA. *Malé vodní turbíny: konstrukce a provoz*. Praha: České vysoké učení technické, 1998.
- [11] United Nations - Disability: Department of economic and social affairs. *United Nations* [online]. [cit. 2019-03-14].
Dostupné z: <https://www.un.org/development/desa/disabilities/envision2030.html>

8.2. Seznam tabulek

Tab. 5.1 – Obsah dílčích funkcí modelu	- 22 -
Tab. 5.2 – Požadovaná struktura datového souboru Hztr.txt	- 28 -
Tab. 5.3 – Datové soubory určující universální charakteristiku turbíny	- 29 -
Tab. 6.1 – Průměrné denní průtoky v profilu Terezín	- 40 -
Tab. 6.2 – Konzumpční křivka dolní vody v profilu Terezín	- 41 -
Tab. 6.3 – Zvolené interpolační metody	- 43 -
Tab. 6.4 – Konstantní parametry pro citlivostní analýzu 1	- 44 -
Tab. 6.5 – Výsledky citlivostní analýzy 1	- 44 -
Tab. 6.6 – Citlivostní analýza 1 – bod maxima	- 45 -
Tab. 6.7 – Konstantní parametry pro citlivostní analýzu 2	- 50 -
Tab. 6.8 – Citlivostní analýza 2 – bod maxima	- 50 -
Tab. 6.9 – Výsledky citlivostní analýzy 2	- 51 -
Tab. 6.10 – Parametry VE pro simulaci v reálné řadě	- 54 -
Tab. 6.11 – Porovnání simulace v reálné řadě a čáře m-denních průtoků	- 56 -

8.3. Seznam obrázků

Obr. 3.1 – Rozdělení vodních elektráren dle instalovaného výkonu	- 6 -
Obr. 3.2 – Maximální průtok vodní elektrárnou	- 8 -
Obr. 3.3 – Rozdělení průtoku a výkonu mezi instalované stroje.....	- 9 -
Obr. 3.4 – Schéma pro určení užitého spádu	- 10 -
Obr. 3.5 – Kritické místo turbíny a sací výška H_s	- 12 -
Obr. 3.6 – Čára překročení m-denních průtoků	- 15 -
Obr. 4.1 – Universální charakteristika: a) Francisovy turbíny, b) Kaplanovy turbíny	- 17 -
Obr. 5.1 – Vývojový diagram programu	- 20 -
Obr. 5.2 – Hlavní výpočetní procedura modelu	- 21 -

Obr. 5.3 – Uživatelské rozhraní GUIDE	- 23 -
Obr. 5.4 – Blok „Vnější hydraulický systém“	- 24 -
Obr. 5.5 – Blok „Ovladače“	- 25 -
Obr. 5.6 – Blok „Vodní elektrárna“	- 25 -
Obr. 5.7 – Blok „Řešení v průtokové řadě“	- 27 -
Obr. 5.8 – Vstupní datový soubor KK_dolní_voda.txt	- 28 -
Obr. 5.9 – Určení přepínacích bodů – simulace pro tři soustrojí	- 30 -
Obr. 5.10 – Určení přepínacích bodů – výkon na turbíně	- 31 -
Obr. 5.11 – Určení přepínacích bodů – součtový výkon turbín	- 32 -
Obr. 5.12 – Zpracování průtoků – konzumpční křivka dolní vody	- 33 -
Obr. 5.13 – Universální charakteristika turbíny	- 35 -
Obr. 5.14 – Provozní charakteristika turbíny	- 36 -
Obr. 5.15 – Prostorové vykreslení účinnosti turbíny	- 37 -
Obr. 5.16 – Vrstevnicový graf výkonu turbíny	- 38 -
Obr. 5.17 – Prostorové vykreslení výkonu turbíny	- 38 -
Obr. 5.18 – Zobrazení kavitačních poměrů na turbíně	- 39 -
Obr. 6.1 – Čára m-denních průtoků v profilu Terezín	- 40 -
Obr. 6.2 – Reálná průtoková řada z roku 2003 v profilu Terezín	- 41 -
Obr. 6.3 – Výsledky citlivostní analýzy 1	- 45 -
Obr. 6.4 – Analýza 1 – Čára trvání průtoků	- 46 -
Obr. 6.5 – Analýza 1 – Čára trvání hladin a spádů	- 47 -
Obr. 6.6 – Analýza 1 – Provozní charakteristika	- 48 -
Obr. 6.7 – Analýza 1 – Prostorové vykreslení účinnosti	- 48 -
Obr. 6.8 – Analýza 1 – Čáry trvání výkonů	- 49 -
Obr. 6.9 – Analýza 2 – Prostorové vykreslení výsledků	- 52 -
Obr. 6.10 – Analýza 2 – Provozní charakteristiky simulací	- 53 -

Obr. 6.11 – Simulace 3 – Čára trvání průtoků	- 54 -
Obr. 6.12 – Simulace 3 – Čára trvání hladin a spádů	- 55 -
Obr. 6.13 – Simulace 3 – Provozní charakteristika (účinnost a výkon)	- 55 -
Obr. 6.14 – Simulace 3 – Čára trvání výkonu	- 56 -
Obr. 9.1 – Universální charakteristika z VD Gabčíkovo	- 63 -
Obr. 9.2 – Universální charakteristika z VD Gabčíkovo – kavitační součinitel	- 64 -

8.4. Seznam zkratk

Agenda 2030 – Přeměna našeho světa: Agenda pro udržitelný rozvoj 2030

DP – Diplomová práce

D_{OK} – Průměr oběžného kola turbíny

GUIDE – Graphical user interface design environment (prostředí pro tvorbu grafického uživatelského rozhraní)

H_{brutto} – Hrubý spád

H_{netto} – Čistý (užitný) spád

MVE – Malá vodní elektrárna

n – provozní otáčky turbíny

OK – Oběžné kolo

OSN – Organizace spojených národů

RK – Rozváděcí kolo

VD – Vodní dílo

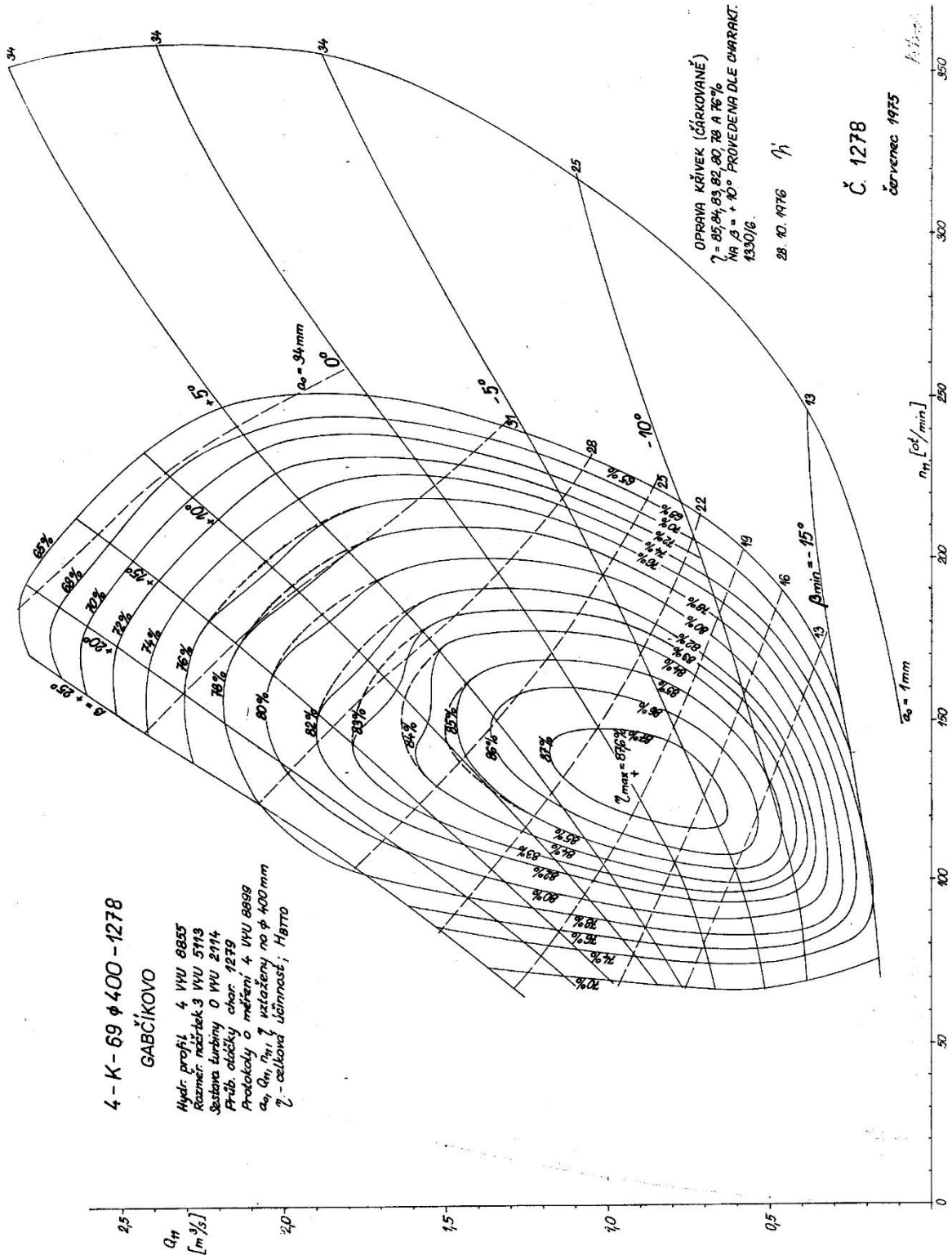
VE – Vodní elektrárna

8.5. Obsah příloženého CD

Matematicky model MVE.pdf – textová část diplomové práce

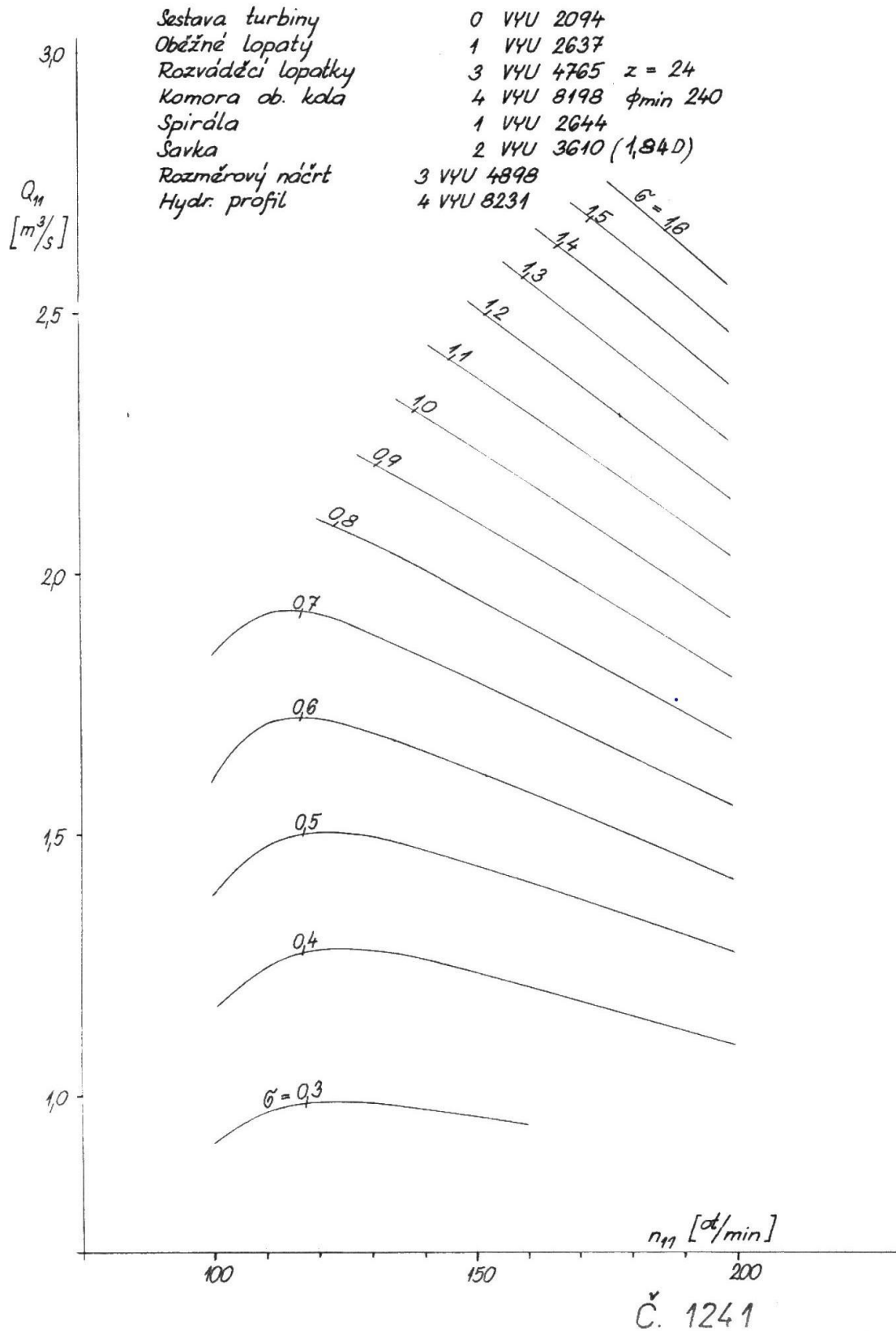
Program – Složka obsahující všechny skripty vytvořeného matematického modelu

9. PŘÍLOHY



Obr. 9.1 – Universální charakteristika z VD Gabčíkovo

4 - K - 69 ϕ 250 (η char. 1275)



Obr. 9.2 – Universální charakteristika z VD Gabčíkovo – kavitační součinitel